

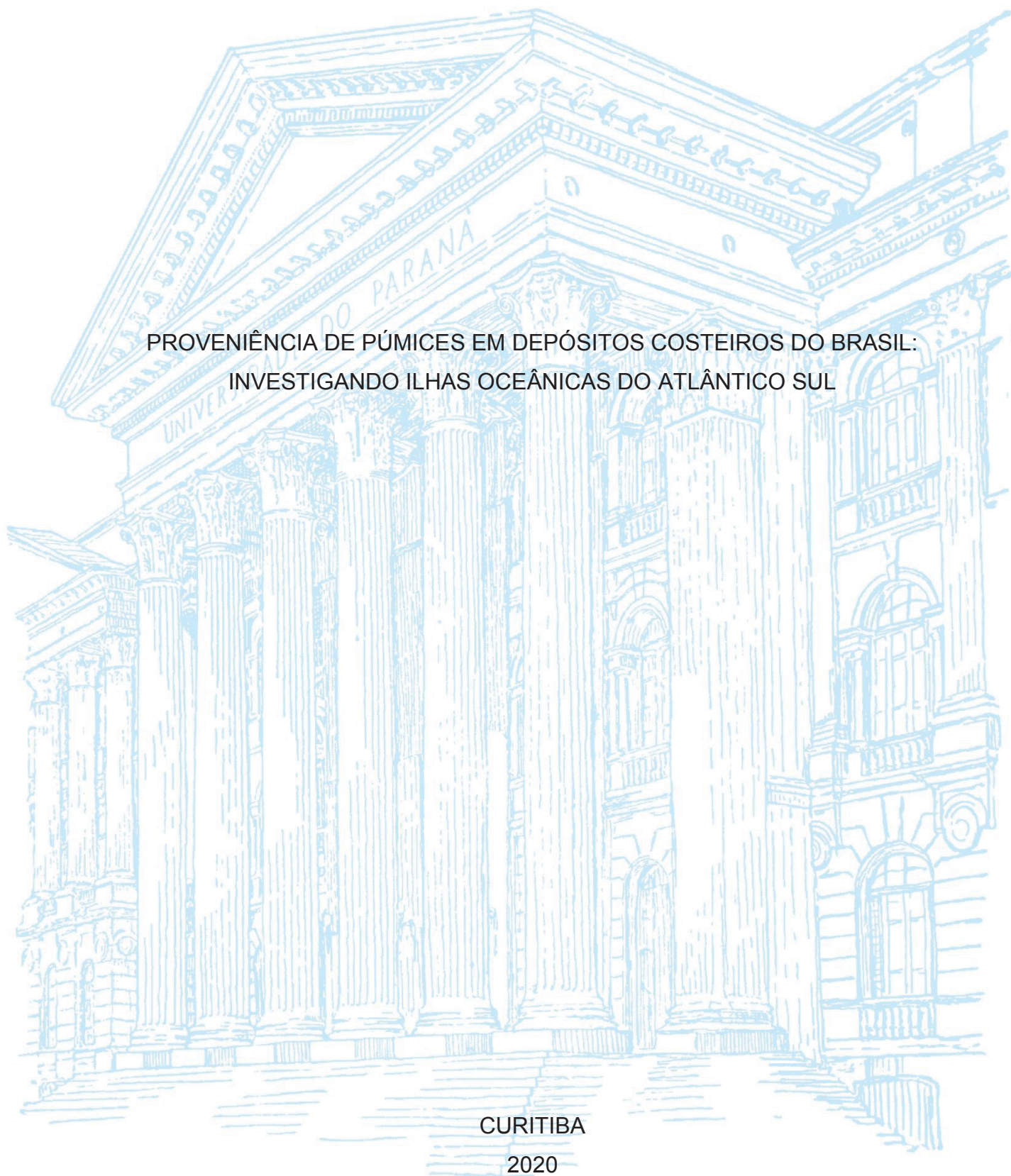
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HERICK FAUST DAUFENBACH

PROVENIÊNCIA DE PÚMICES EM DEPÓSITOS COSTEIROS DO BRASIL:
INVESTIGANDO ILHAS OCEÂNICAS DO ATLÂNTICO SUL

CURITIBA

2020



HERICK FAUST DAUFENBACH

PROVENIÊNCIA DE PÚMICES EM DEPÓSITOS COSTEIROS DO BRASIL:
INVESTIGANDO ILHAS OCEÂNICAS DO ATLÂNTICO SUL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientadora: Profa Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos

Coorientadores: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo e Profa. Dra. Maria Cristina Souza

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

D238p

Daufenbach, Herick Faust
Proveniência de púmices em depósitos costeiros do Brasil: Investigando
Ilhas oceânicas do Atlântico Sul [recurso eletrônico] / Herick Faust
Daufenbach. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da
Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2020.

Orientador: Eleonora Maria Gouvêa Vasconcelos – Coorientador:
Rodolfo José Angulo. Coorientador: Maria Cristina Souza

1. Vulcanismo. 2. Geoquímica. 3. Correntes oceânicas. 4. Atlântico Sul,
Oceano. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vasconcelos, Eleonora Maria
Gouvêa. III. Angulo, Rodolfo José. IV. Souza, Maria Cristina. V. Título.

CDD: 552.1

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de HERICK FAUST DAUFENBACH intitulada: **PROVENIÊNCIA DE PÓMICES EM DEPOSITOS COSTEIROS DO BRASIL: INVESTIGANDO ILHAS OCEÂNICAS DO ATLÂNTICO SUL**, sob orientação da Profa. Dra. ELEONORA MARIA GOUVÊA VASCONCELLOS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Abril de 2020.

Assinatura Eletrônica

28/04/2020 10:23:27.0

ELEONORA MARIA GOUVÊA VASCONCELLOS

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

27/04/2020 19:14:13.0

FABIO BRAZ MACHADO

Avallador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

27/04/2020 17:34:39.0

MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG

Avallador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA-CENTRO POLITÉCNICO-UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3365 - E-mail: posgeol@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 40257

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 40257

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ivo e Lindonice, e a todas as pessoas
que acompanharam a evolução dessa pesquisa.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos, pela orientação, acompanhamento, discussões e por todo trabalho realizado comigo, não só no mestrado, mas em todos os anos anteriores, desde o Gabro José Fernandes e o Gabro de Apiaí.

Aos meus coorientadores Angulo e Cris, por todo trabalho em conjunto, conselhos e auxílio, e, principalmente, pela confiança em mim nos trabalhos da Ilha da Trindade.

Ao meu amigo Leonardo Barão (Coxinha), por ter contribuído decisivamente na realização desse trabalho, sendo um verdadeiro coorientador dessa pesquisa, auxiliando em absolutamente todos os estágios dessa dissertação, desde a coleta de dados, discussões e parceria nos trabalhos de campo na Ilha da Trindade até as correções do artigo final.

À Fernanda Avelar e a todos os militares das cabritadas Entrosados e Copa da Cabrita, em especial à Capitã de Corveta Rosângela dos Santos Farias, pelo apoio em todos os campos, longas conversas, risadas e boa convivência na Ilha da Trindade, sem as quais seria impossível suportar dois meses na Ilha. Presto minhas homenagens ao Suboficial Enfermeiro Anderson Arcanjo, militar com quem convivi na Ilha da Trindade e que infelizmente foi a óbito em virtude do Coronavírus.

À Marinha do Brasil por toda a excelente infraestrutura disponibilizada para a realização dos trabalhos de campo na Ilha da Trindade.

Ao meu amigo Luiz Mota, por tantas conversas e risadas durante esses dois anos de LECOST, e aos demais amigos e colegas do LECOST, que também influenciaram positivamente nesse trabalho.

Aos laboratórios LAMIR e LAPEM, ao Departamento de Geologia e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia por todo suporte e infraestrutura durante todos esses anos.

À CAPES pelo fomento da bolsa de estudos a nível de mestrado e à CNPq pelo financiamento dos projetos número 557299/05-5, 557141/2009-5 e 442865/2015-5.

Aos meus pais, Ivo e Lindonice, por todo apoio, colaboração e sacrifício prestados a mim, para que eu pudesse seguir os meus sonhos.

À minha amada Tamires, namorada, amiga, companheira, conselheira, bióloga que tanto ouviu sobre púmices, rochas vulcanoclásticas e geoquímica. Os

meus mais sinceros agradecimentos por esse apoio, que foi vital nesses anos de mestrado, e por todo amor compartilhado.

Agradeço ao meu cachorrinho Lampião, por sempre me receber com muita alegria em casa e por sempre me convencer a brincar com ele, mesmo quando estava concentrado neste trabalho. Estas distrações, que parecem tão triviais, são essenciais para nos mostrar o melhor lado da vida.

Aos meus demais amigos e amigas, por todo apoio e momentos de descontração.

*Abre a mente ao que eu te revelo
e retém bem o que eu te digo, pois não é ciência
ouvir sem reter o que se escuta.
Dante Alighieri – A Divina Comédia*

RESUMO

Devido à sua alta fluvariabilidade, púmices gerados em erupções explosivas ocorridas em regiões marinhas são frequentemente transportados por correntes marítimas e depositados em litorais de todo o planeta, distantes da sua fonte. No Brasil, nas praias de Camaçari (Bahia), Pontal do Paraná (Paraná), e Ilha da Trindade, são encontrados, em meio aos sedimentos costeiros holocênicos, púmices cujo tamanho varia entre 2 a 7 cm de diâmetro. Em lâmina delgada, estes fragmentos de vidro vulcânico são compostos em mais de 80% por vesículas e vidro argilizado, possuem textura fibrosa e estrutura de fluxo, marcada pela orientação das vesículas. Os cristaloclastos são formados por feldspato alcalino, egirina-augita e kaersutita, de granulação fina a média. Com base em análises geoquímicas, possuem altos teores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (aproximadamente 13%) em relação à sílica (aproximadamente 64%). Além disso, têm forte enriquecimento em elementos LILE (e.g. Rb, Th, U, Nb) e ETRs leves (La e Ce), depleção em elementos HFSE e ETRs pesados, com anomalias negativas de Eu, Ba, Sr, P e Ti, indicando processos avançados de fracionamento geoquímico. As assinaturas geoquímicas das amostras das diferentes localidades se mostram semelhantes, possivelmente pertencendo à mesma fonte e ao mesmo evento vulcânico. Quando se comparam os padrões geoquímicos dos púmices com a geoquímica das ilhas oceânicas do Atlântico Sul, os fragmentos vulcânicos se alinham com a tendência evolutiva do Grupo Tristão da Cunha, possivelmente representando termo mais enriquecido a partir da fonte geradora do sistema magmático deste Grupo. Análises estatísticas determinam que os púmices possuem grau de correlação maior com Tristão da Cunha, corroborando com a geoquímica. O transporte desses fragmentos a partir do Grupo de ilhas até os diferentes pontos da costa do Brasil é fisicamente possível através do Giro Subtropical do Atlântico Sul, sendo transportados pelas correntes Sul Atlântica, de Benguela, Sul Equatorial e do Brasil.

Palavras-chave: Vulcanismo alcalino; geoquímica; correntes oceânicas; Grupo Tristão da Cunha, estatística.

ABSTRACT

Due to their high buoyancy, pumices generated by explosive eruptions in marine regions are often carried by sea currents and deposited on coastlines around the planet, far from their source. In Brazil, on the beaches of Camaçari (Bahia), Pontal do Paraná (Paraná) and Trindade Island, pumices whose size varies between 2 to 7 cm in diameter are found in the midst of the Holocenic coastal sediments. In a thin section, these fragments of volcanic glass are composed of vesicles and clayed glass in more than 90%, have a fibrous texture and flow structure, marked by the orientation of the vesicles. Crystallites are formed by alkali feldspar, aegirine-augite and kaersutite, fine to medium grain. Based on geochemical analyzes, it has high levels of $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (approximately 13%) in relation to silica (approximately 62%). In addition, they have strong enrichment in the LIL elements (Rb, Th, U, Nb) and LREE (La and Ce), depletion in the HFS elements and HREE, with negative Eu, Ba, Sr, P and Ti anomalies, indicating advanced processes of geochemical fractionation. The geochemical signatures of these samples from different locations are similar, possibly belonging to the same source and the same volcanic event. When the geochemical patterns of the pumices are compared with the geochemistry of the ocean islands of the South Atlantic Ocean, the volcanic fragments align themselves with the evolutionary trend of the Tristan da Cunha Group, possibly representing a more enriched term from the generating source of this Group's magmatic system. Statistical analyzes determine that pumices have a higher degree of correlation with Tristan da Cunha, corroborating with geochemistry. The transport of these fragments from Tristan da Cunha to the different points of the coast of Brazil is physically possible through the South Atlantic Subtropical Gyre, being transported by the South Atlantic, Benguela, South Equatorial and Brazil currents.

Keywords: Alkaline volcanism; geochemistry; ocean currents; Tristan da Cunha Group; statistics.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS DA DISSERTAÇÃO

Figura 1- Mapa de localização das ilhas oceânicas do Atlântico Sul e localidades onde foram encontrados os púmices, objeto de estudo dessa pesquisa. Adaptado de Jeffery & Gertisser (2018).	18
Figura 2 – Mapa de localização das amostras estudadas por Frick & Kent (1984) coletadas no litoral da África do Sul. Editado de Frick & Kent (1984).	20
Figura 3 – Mapa com a localização do restante das amostras estudadas por Frick & Kent (1984) coletadas em diferentes litorais do planeta. Adaptado de Frick & Kent (1984).	21
Figura 4 – Diagrama ternário CaO x Na ₂ O x K ₂ O com os grupos geoquímicos definidos por Frick & Kent (1984) para as amostras de púmices. Modificado de Frick & Kent (1984).	22
Figura 5 – Fotografia dos púmices coletados após a erupção submarina de 2004, próxima a Tristão da Cunha. O fragmento da esquerda foi retirado diretamente da superfície da água, coletado por pescadores. O fragmento da direita foi coletado nas praias de Tristão da Cunha. A seta azul indica a orientação das vesículas tubulares do púmice. Imagem de Hards (2009).	24
Figura 6 – Mapa esquemático da circulação superficial (0 m) do Atlântico Sul. As ilhas oceânicas abordadas na pesquisa estão assinaladas com estrelas. Editado de Peterson & Stramma (1991).	26
Figura 7 – Diagramas TAS (Total álcalis-sílica) de Le Bas <i>et al.</i> (1986) com a classificação de cada ilha abordada nesse estudo, apresentando a linha que divide as amostras entre séries alcalina e subalcalina/toleítica, de acordo com a classificação de Irvine & Baragar (1971). Abreviações: PB: picrobasalto; B: basalto; BA: andesito basáltico; A: andesito; D: dacito; R: riolito; F: foidito; BS: basanita; TB: traquibasalto; BTA: traquiandesito basáltico; TA: traquiandesito; T: traquito; Te: tefrito; PTe: fonotefrito; TeP: tefrifonolito; P: fonolito.....	33
Figura 8 - Geologia da Ilha da Trindade baseado em Almeida (1965) e Pires <i>et al.</i> (2016).	90

Figura 9 – Colunas litoestratigráficas levantadas no Complexo Trindade. F – Intrusão fonolítica; CF – Cinza fina; CG – Cinza grossa; C – Cinza; L – Lápilli; B – Bloco.	92
Figura 10 – Púmices (agrupados) encontrados na Praia dos Andradas, na Ilha da Trindade.	93
Figura 11– Geoquímica das amostras de púmices projetadas em relação às amostras analisadas da Ilha da Trindade e o campo geoquímico da Ilha delimitado em verde (Referências no artigo). Pontal do Paraná (estrela); Camaçari (Triângulo roxo); Ilha da Trindade (círculos verdes); Rochas piroclásticas e fonolitos da Ilha da Trindade (triângulos vermelhos); Campo geoquímico da Ilha da Trindade (campo verde).	95
Figura 12 – Geoquímica das amostras de púmices projetadas em relação às amostras analisadas da Ilha da Trindade e o campo geoquímico da Ilha. Símbolos apresentados na Figura 11	96

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO

Figura 1.1 – Mapa de localização das ilhas oceânicas do Atlântico Sul e as localidades da Praia dos Andradas (Ilha da Trindade), Pontal do Paraná (PR) e Camaçari (BA). Adaptado de Jeffery & Gertisser (2018).	47
Figura 1.2 – Mapa da circulação superficial (0 m) do Atlântico Sul. As ilhas oceânicas estudadas estão assinaladas por estrelas amarelas. Adaptado de Peterson & Stramma (1991).	48
Figura 1.3 – Fotomicrografia das lâminas dos púmices de Pontal do Paraná (A e B), Ilha da Trindade (C, D e G) e Camaçari (E e F). Símbolos: Feldspato Alcalino (FK); Egirina-augita (EA e círculos verdes); Kaersutita (KA e retângulos vermelhos); Quartzo (QTZ). Nicóis paralelos.....	60
Figure 1.4 – Classificação das amostras de púmices, a partir do diagrama Total Alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs. Silica de Le Bas <i>et al.</i> (1986) e linha de separação da série alcalina/subalcalina de Irvine & Baragar (1971). Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo) e Ilha da Trindade (dois círculos). Siglas: PB: picrobasalto; B: basalto; BA: andesito basáltico; A: andesito; D: dacito; R: riolito; F: foidito; BS: basanita; TB: traquibasalto; BTA: traquiandesito basáltico; TA: traquiandesito; T: traquito; Te: tefrito; PTe: fonotefrito; TeP: tefrifonolito; P: fonolito	63

Figura 1.5 – Diagrama multielementar para (A) elementos terras raras ETR normalizado pelo condrito de Nakamura (1974) e (B) para elementos traço normalizados pelo Manto Primordial de McDonough & Sun (1995). Púmices de Pontal do Paraná (Cruz vermelha); Camaçari (Triângulo roxo); e Ilha da Trindade (Losangos verde e azul).....	64
Figura 1.6 – Diagramas discriminantes com os campos geoquímicos das ilhas oceânicas e a composição dos púmices estudados. Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo) e Ilha da Trindade (dois círculos).....	66
Figura 1.7 – Diagramas de variação com a distribuição dos campos geoquímicos das ilhas oceânicas e a composição dos púmices. Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo) e Ilha da Trindade (dois círculos). Referências da Figura 1.6..	68
Figura 1.8 – Gráficos da média (círculos coloridos) e desvio padrão (barras) dos ΔR s de cada ilha, organizados por elementos. Os valores exatos e as siglas estão listados na Tabela 1.4	76
Figura 1.9 – Composições dos púmices do litoral brasileiro, do Grupo B da África do Sul (Frick & Kent, 1984) e da erupção de 2004 próxima a Tristão da Cunha (Reagan <i>et al.</i> , 2008). Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo), Ilha da Trindade (círculos), África do Sul (quadrados vazados) e erupção de 2004 (quadrado cheio).....	79
Figura 1.10 – Diagrama multielementar para ETRs normalizado pelo condrito de Nakamura (1974) comparando as amostras da erupção de 2004 e os púmices do Brasil. Símbolos: Púmices de Pontal do Paraná (Cruz vermelha); Camaçari (Triângulo roxo); Ilha da Trindade (Losangos verde e azul); Tristão da Cunha (triângulo preto).	80

LISTA DE TABELAS

LISTA DE TABELAS DA DISSERTAÇÃO

Tabela 1 – Sumário das características geoquímicas dos cinco grupos definidos por Frick & Kent (1984) e suas respectivas fontes ou região de provável origem	22
Tabela 2 – Resultados analíticos para as rochas piroclásticas e fonolitos da Ilha da Trindade	93

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO

Tabela 1.1– Resultados analíticos dos púmices de Camaçari, Ilha da Trindade e Pontal do Paraná. Abaixo as porcentagens de óxidos recalculadas a partir da retirada dos valores de LOI.	61
Tabela 1.2 - Resultados dos Coeficientes de Correlação de Spearman (Rs) para cada ilha, com e sem os púmices no conjunto amostral	69
Tabela 1.3 – Variação dos coeficientes de correlação (ΔR_s), calculados a partir da subtração dos coeficientes “com púmice” e “sem púmice” da Tabela 1.2 para cada ilha oceânica.	71
Tabela 1.4 – Valores de ΔR_s agrupados a partir de cada elemento. As colunas reúnem as medidas de ΔR_s para cada ilha oceânica com os valores respectivos da média e desvio padrão populacional dos ΔR_s . Siglas: AS-Ascensão; TC-Tristão da Cunha; TR-Trindade; FN-Fernando de Noronha; CL-Linha Camarões; GO-Gough; SH-Santa Helena.	73
Tabela 1.5 – Resultados analíticos dos púmices desse trabalho e os resultados obtidos por Reagan <i>et al.</i> (2008) para os púmices gerados após a erupção de 2004 próxima a Tristão da Cunha (2004 pumices), e os resultados do conjunto de púmices do Grupo B de Frick & Kent (1984) (AM2, AM10 e AM55).	77

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CA	- Camaçari
Ce	- Cério
ETR (L/P)	- Elementos Terras Raras (Leves/Pesados)
GSAS	- Giro Subtropical do Atlântico Sul
HFSE	- <i>High Field Strength Element</i>
IT	- Ilha da Trindade
La	- Lantânio
LILE	- <i>Large Ion Lithophile Element</i>
Nb	- Nióbio
PP	- Pontal do Paraná
Rb	- Rubídio
Sr	- Estrôncio
Y	- Ítrio
Zr	- Zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ - Somatório de números

Δ - subtração de números

R_s – Coeficiente de Correlação de Spearman

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	16
1.1 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
1.2 – INTRODUÇÃO AO TEMA	16
1.3 – OBJETIVOS	18
1.4 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
1.4.1 – Sobre a origem de púmices depositados em praias.....	19
1.4.2 – Púmices no Brasil.....	24
1.4.3 – A circulação superficial do Atlântico Sul	25
1.4.4 – Ilhas oceânicas.....	28
1.4.4.1 Ilha Bouvet.....	30
1.4.4.2 Ilha Gough	31
1.4.4.3 Grupo Tristão da Cunha.	34
1.4.4.4 Ilha da Trindade.....	35
1.4.4.5 Santa Helena	36
1.4.4.6 Ascensão.....	37
1.4.4.7 Fernando de Noronha.....	38
1.4.4.8 Ilhas da Linha Camarões.....	39
1.5 – MATERIAIS E MÉTODOS	40
1.5.1 – Levantamento bibliográfico e obtenção de dados	40
1.5.2 – Levantamentos de campo e amostragem.	40
1.5.3 – Simulação de dispersão por correntes marítimas.....	41
1.5.4 – Análise petrográfica.....	41
1.5.5 – Análises geoquímicas de rocha total.....	41
1.5.6 – Tratamento estatístico	42
2 CAPÍTULO 2 - RESULTADOS	44
2.1 – ARTIGO	44
2.1.1 Introdução	45
2.1.2 Contextualização geológica e oceanográfica	47
2.1.3 Métodos de trabalho.....	54
2.1.4 Resultados	57
2.1.5 Discussão.....	80
2.1.6 Conclusões.....	83

2.1.7 Referências	83
2.2 – RESULTADOS COMPLEMENTARES	90
2.2.1 Trabalhos de campo.....	90
2.2.2 Geoquímica.....	93
3 CAPÍTULO 3 – DISCUSSÃO INTEGRADA E CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
3.1 VULCANISMO FONOLÍTICO DA ILHA DA TRINDADE E OS PÚMICES	97
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
REFERÊNCIAS.....	99

1 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 3 capítulos, mais as referências. No Capítulo 1 estão inseridos os itens de contextualização sobre a problemática abordada, a proposta dessa pesquisa e como foi desenvolvida. Neste capítulo estão inseridos a introdução ao tema, objetivos, fundamentação teórica e materiais e métodos. No Capítulo 2 estão inseridos os resultados obtidos nesse trabalho na forma de artigo, apresentando os principais resultados, e na forma de resultados complementares, com os resultados obtidos pela pesquisa e que não foram descritos no artigo. O Capítulo 3 traz a discussão integrada, abordando os resultados do artigo juntamente aos resultados complementares, e as considerações finais, apresentando as principais conclusões deste trabalho. Por último são listadas todas as referências usadas nesta pesquisa, incluindo as do artigo.

1.2 – INTRODUÇÃO AO TEMA

A presença de púmices em depósitos costeiros não é algo raro de se encontrar. Charles R. Darwin, em seu trabalho intitulado *Geological Observations on South America*, de 1846, já descreve seixos de púmices na praia de Bahia Blanca, Argentina. Porém, diversas são as praias ao redor do globo que, mesmo se assentando sobre litorais de regiões cratônicas estáveis, possuem dentre seus sedimentos fragmentos desse material estritamente vulcânico.

Estudos experimentais, como de Witham & Sparks (1984), Manville *et al.* (1998) e Fauria *et al.* (2016), demonstram a alta flutuabilidade dos púmices na água, que podem permanecer por meses a anos flutuando, até a maioria de suas vesículas estar preenchida por água e, finalmente, afundar.

Devido a essa peculiar característica, púmices que se originem a partir de erupções vulcânicas ocorridas próximas ao mar, como em arcos de ilhas, ilhas oceânicas ou vulcões submarinos, podem ser lançados na água e ficar à deriva nos oceanos, transportados por correntes marítimas superficiais. Seu destino final pode ser uma praia distante ou o fundo do mar

Essa premissa norteou diversos trabalhos que têm como objetivo a determinação da fonte de púmices encontrados em praias. Trabalhos como de Frick & Kent (1984), Risso *et al.* (2002), Jokiel & Cox (2003) e Bryan *et al.* (2004) já abordam essa temática, estudando púmices em praias da África do Sul, Terra do Fogo, Havaí, Austrália, entre outros.

No litoral do Brasil, apesar de púmices em praias já terem sido descritos desde Hartt (1870), poucos trabalhos têm sido realizados sobre esse assunto, destacando-se Angulo & Vasconcellos (1998) e Daufenbach *et al.* (2018 e 2019). Nesses trabalhos, os autores investigam a geoquímica de fragmentos pumíceos encontrados em Balneário Barrancos, município de Pontal do Paraná, Paraná, e sugerem que esses materiais teriam afinidade alcalina e estariam relacionados a fonolitos e traquitos de ilhas oceânicas.

Além dos púmices de Pontal do Paraná, o acervo do Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Paraná (LECOST-UFPR) possui fragmentos semelhantes coletados na praia de Itacimirim, município de Camaçari, Bahia, e nas praias da Ilha da Trindade, no Atlântico Sul

Como a fonte desses púmices ainda não foi definida, e não se têm publicações sobre este tema no Brasil, o presente trabalho tem como objetivo principal determinar a fonte dos púmices de Pontal do Paraná, Ilha da Trindade e Camaçari, levando em consideração a composição alcalina dos púmices paranaenses e sua provável associação com o vulcanismo de ilhas oceânicas (Angulo & Vasconcellos, 1998; Daufenbach *et al.*, 2018 e 2019). Com isso, a presente pesquisa testará a hipótese de que estes fragmentos estejam associados à atividade vulcânica (ativa ou inativa) de uma das ilhas oceânicas do Atlântico Sul, sendo essas as ilhas Bouvet, Gough, Grupo Tristão da Cunha, Trindade, Santa Helena, Ascensão, Fernando de Noronha e Linha Camarões (Figura 1)

Quando o presente trabalho estava em sua fase inicial, a hipótese que foi considerada era de que a Ilha da Trindade seria fonte dos púmices. A partir disso, foi realizado um trabalho de campo na Ilha, onde foram coletados diversos dados. Entretanto, após comparações iniciais e discussões, a pesquisa ampliou a hipótese a ser testada, considerando, então, um número maior de ilhas oceânicas do Atlântico Sul como possíveis fontes. Com isso, o artigo científico que será escrito, apresentado e submetido a partir dessa dissertação irá discutir apenas os resultados referentes aos púmices. Os resultados referentes à Ilha da Trindade serão apresentados nessa

dissertação como resultados complementares. Para poder conectar os resultados obtidos da Ilha da Trindade com os resultados do artigo, esta conexão terá um objetivo específico, onde se discutirá se os púmices encontrados na Ilha da Trindade poderiam, ou não, ter se originado na própria Ilha.

Isto posto, a área abrangida dentro da pesquisa é apresentada na Figura 1, onde se localizam as ilhas oceânicas do Atlântico Sul, incluindo a Praia dos Andradas (Ilha da Trindade) e as localidades de Pontal do Paraná e Camaçari.

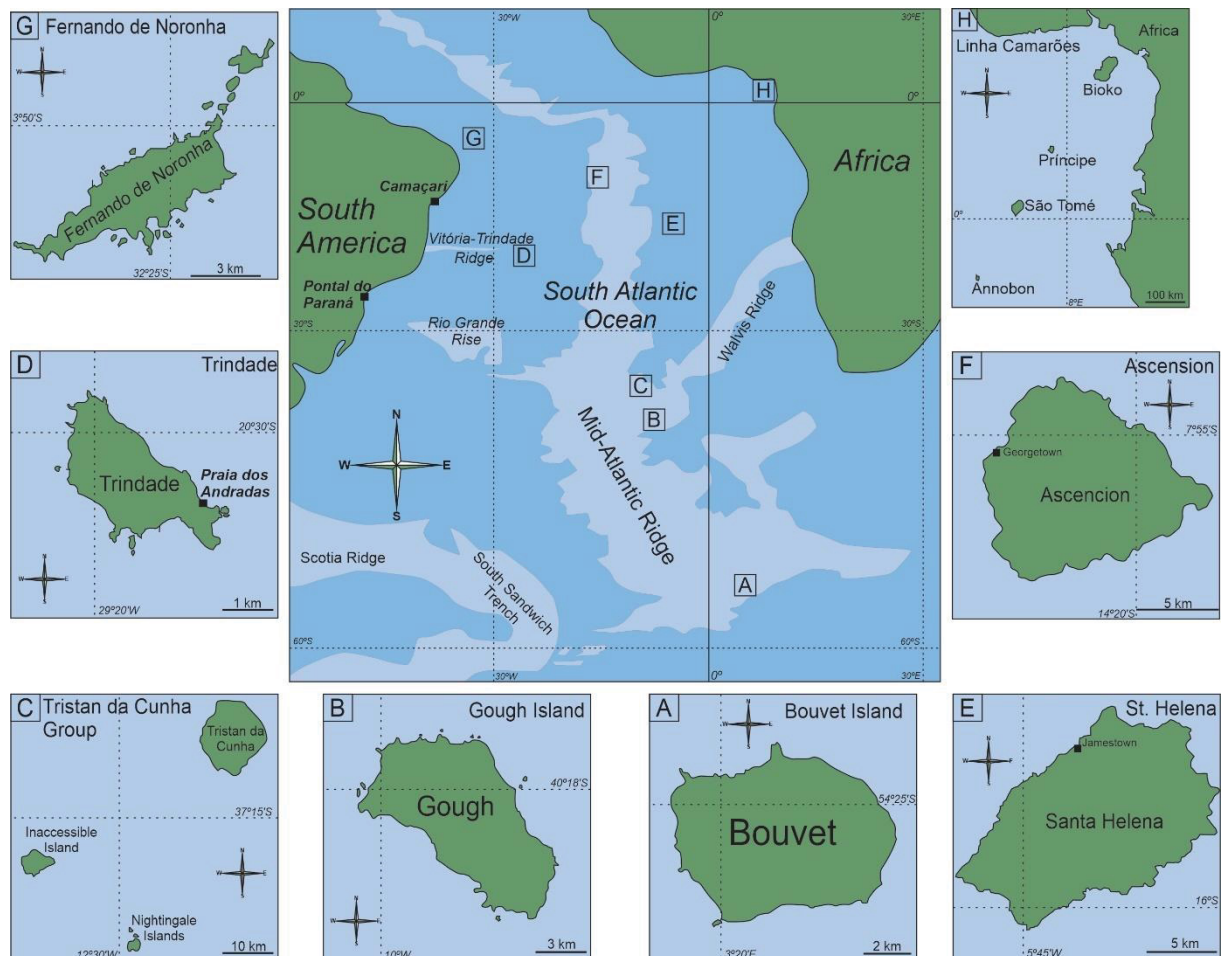


Figura 1- Mapa de localização das ilhas oceânicas do Atlântico Sul e localidades onde foram encontrados os púmices, objeto de estudo dessa pesquisa. Adaptado de Jeffery & Gertisser (2018).

1.3 – OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a determinação da fonte dos púmices encontrados no litoral do Brasil. Como objetivos específicos tem-se: 1) descrição macro e microscópica dos púmices, para identificar os cristaloclastos

presentes nesses fragmentos; 2) determinação das assinaturas litogeoquímicas dos púmices da Bahia (BA), Ilha da Trindade (IT) e Pontal do Paraná (PP); 3) compreensão acerca das correntes oceânicas que predominam no litoral do Brasil e o sistema de circulação oceânica ao qual está vinculada, auxiliando na delimitação da área de estudo; 4) determinação dos padrões geoquímicos das ilhas oceânicas do Atlântico Sul para comparação com as assinaturas dos púmices do litoral brasileiro; 5) definição de uma ou mais fontes para os fragmentos, assinalando o provável trajeto percorrido pelos púmices através do Atlântico Sul; 6) determinação da origem dos púmices encontrados na Ilha da Trindade, se poderiam ter sua origem relacionada ao vulcanismo da própria Ilha.

1.4 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.4.1 – Sobre a origem de púmices depositados em praias

A presença de púmices depositados em praias é algo que chama a atenção de pesquisadores desde, pelo menos, 1846, quando o naturalista britânico Charles R. Darwin descreve seixos de púmices depositados em antigas linhas de costa na região de Bahia Blanca, Argentina (Darwin, 1846). Dentre as diversas e brilhantes observações do naturalista acerca da geologia da América do Sul, durante sua expedição memorável a bordo do *Beagle* (Darwin, 1845), o autor reconhece naquela região diferentes linhas de costa que foram gradualmente soerguidas pela orogenia andina. Em uma dessas linhas, entre 30 e 60 metros acima do nível do mar, o naturalista descreve seixos de púmices esbranquiçados, aos quais atribui sua origem aos Andes. Segundo ele, não haveria dúvidas de que esse material vulcânico teria vindo da Cordilheira, transportado pelos rios que cortam o continente, até chegar no Oceano Atlântico e se depositar nas praias. Posteriormente, com a elevação da região, alcançaram as altitudes descritas pelo autor.

Nesse caso, a hipótese e conclusão sobre a origem dos fragmentos podem ser mais simples, considerando que existe atividade vulcânica próxima ao local. Mas em outros casos, tal discussão exige a consideração das correntes oceânicas como forma de transporte desses fragmentos através dos oceanos, já que em muitos litorais não existe vulcanismo associado.

Pesquisas como de Sutherland & Olsen (1968), Coombs & Landis (1966) e Risso *et al.* (2012) estudam a dispersão de fragmentos gerados após uma erupção

submarina na Ilha Zavodovski, nas Ilhas Sandwich do Sul, em 1962 (Gass *et al.* 1963). Estes fragmentos teriam sido transportados por correntes marítimas até litorais do sul da Austrália, Tasmânia, Nova Zelândia e Terra do Fogo. No caso de Risso *et al.* (2012) a pesquisa utiliza dados geoquímicos juntamente com o estudo de correntes oceânicas para associar os púmices da Terra do Fogo com a erupção submarina de 1962.

Outras pesquisas têm abordagem semelhante, como Jokiel & Cox (2003), que estudam padrões de dispersão de púmices utilizando amostras coletadas no Havaí e Ilha de Páscoa, as quais teriam fontes diversas, e Bryan *et al.* (2004), que trabalham com amostras coletadas em Fiji e norte da Austrália, derivadas de erupção submarina próxima a Tonga, em 2002.

Contudo, poucos trabalhos têm suas pesquisas inseridas no contexto do Oceano Atlântico Sul. O de maior notoriedade é a investigação de Frick & Kent (1984), que estudam púmices coletados em praias principalmente da África do Sul (Figura 2), mas também da costa leste da África, Madagascar, ilhas Maurício, Ilhas Coco, Austrália, Indonésia, Brasil, Ilhas Marion e Ilhas Bouvet (Figura 3), sendo que em alguns desses locais não há vulcanismo ativo.

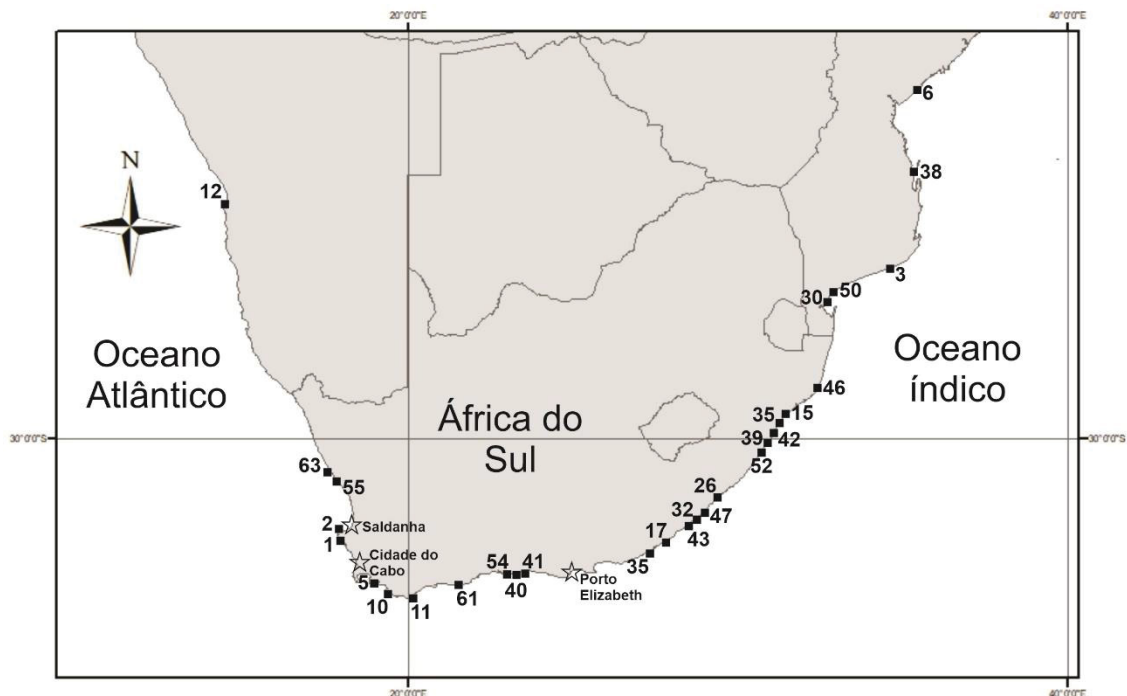


Figura 2 – Mapa de localização das amostras estudadas por Frick & Kent (1984) coletadas no litoral da África do Sul. Editado de Frick & Kent (1984).

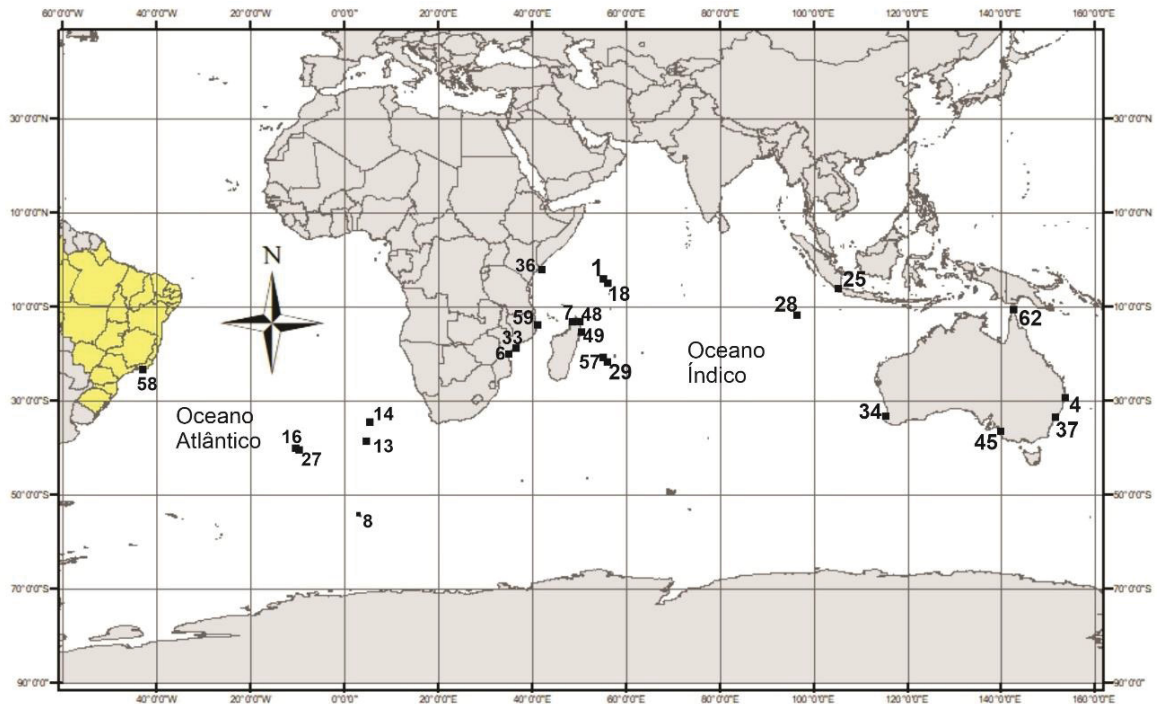


Figura 3 – Mapa com a localização do restante das amostras estudadas por Frick & Kent (1984) coletadas em diferentes litorais do planeta. Adaptado de Frick & Kent (1984).

Neste trabalho, os autores fazem uma abordagem principalmente geoquímica a partir de 63 amostras. Utilizam diagramas binários discriminantes, ternários e diagramas de variação para subdividir essas amostras em 5 grupos geoquímicos distintos (Figura 4 e Tabela 1), e sugerem a provável fonte de cada um desses grupos de fragmentos (Tabela 1). Ainda nesta pesquisa, os autores fazem uma breve discussão sobre as correntes marítimas predominantes no hemisfério sul, demonstrando que esses sistemas oceânicos corroboram com as conclusões obtidas considerando a geoquímica.

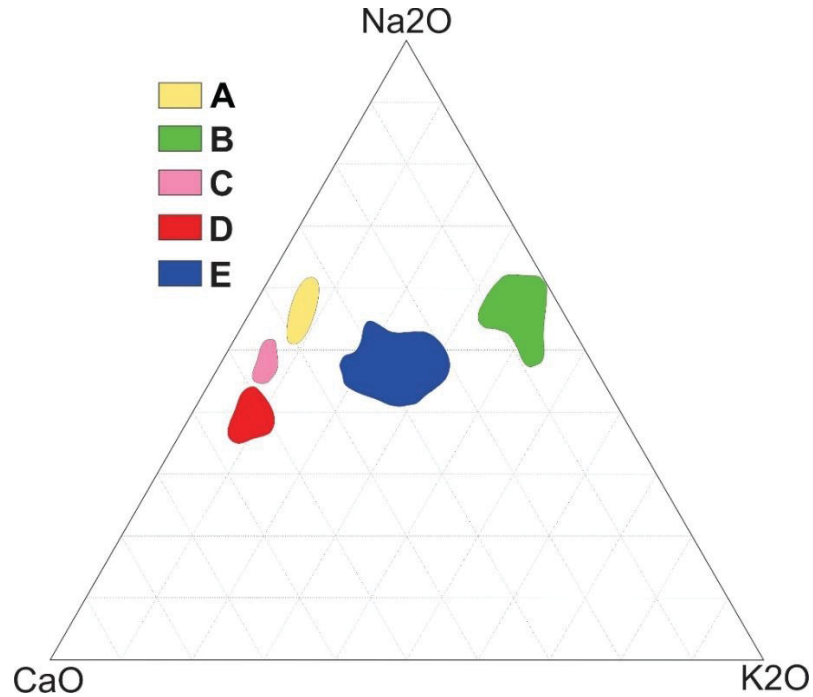


Figura 4 – Diagrama ternário CaO x Na₂O x K₂O com os grupos geoquímicos definidos por Frick & Kent (1984) para as amostras de púmices. Modificado de Frick & Kent (1984).

Tabela 1 – Sumário das características geoquímicas dos cinco grupos definidos por Frick & Kent (1984) e suas respectivas fontes ou região de provável origem. Adaptado de Frick & Kent (1984).

Grupo	Óxidos maiores	Elementos menores	Fonte
A	TiO ₂ 0,2-0,3%	baixos Zr, Nb, Rb, Th, Pb e Zn	Ilhas Sandwich do Sul
	Fe ₂ O ₃ 2,8-3,8%		
	K ₂ O 0,5-1%		
	Na ₂ O/CaO 2,6-1,2		
B	TiO ₂ 0,2-0,45%	Altos Zr, Nb, Rb, Th, Pb e Zn. Baixos Y e Sr	Oceano Atlântico Sul
	Fe ₂ O ₃ 1,7-25%		
	K ₂ O 3,5-7%		
	Na ₂ O/CaO 8-9		
C	TiO ₂ 0,4-0,5%	sem dados	Oceano Índico Sul
	Fe ₂ O ₃ 4%		
	K ₂ O 0,5-1%		
	Na ₂ O/CaO 1		
D	TiO ₂ 0,5-0,9%	sem dados	Trincheira de Tonga
	Fe ₂ O ₃ 5,3-10%		
	K ₂ O 0,5-1%		
	Na ₂ O/CaO 1-0,4		
E	TiO ₂ 0,6-1%	Altos Y e Sr. Intermediários Zr, Nb, Rb, Th	Krakatoa
	Fe ₂ O ₃ 2,8-4,8%		
	K ₂ O 1,6-3,0%		
	Na ₂ O/CaO 2,9-1,2		

Dentre os grupos definidos por Frick & Kent (1984), o grupo B, mais alcalino, é composto por amostras coletadas no litoral atlântico da África do Sul e no Rio de Janeiro, o que leva os autores a determinar que a fonte desses fragmentos está associada à Cadeia Meso-Atlântica, embora não determinem uma fonte específica.

Ainda no contexto sul-atlântico, além da pesquisa de Frick & Kent (1984), na literatura se encontram alguns relatos de ocorrência de manchas desses fragmentos flutuando no Atlântico Sul, geralmente próximos a Tristão da Cunha (Figura 5). Bevan (1961) relata o registro do Capitão Charles Small de 1725, a bordo do navio *Lyell*, que descreve uma camada de púmices encontrada flutuando no mar a cerca de 900 km a leste de Tristão da Cunha, “de longe a terra mais próxima”. A partir dos relatos do capitão Charles Small, o autor dá noção do tamanho da erupção que formou esta camada de fragmentos, já que a embarcação *Lyell* cruzou com camadas de púmices durante três dias, numa área aproximada de 39 mil km², somando um peso aproximado de 20 milhões de toneladas, segundo os cálculos de Bevan (1961).

Mais recentemente, Hards (2004) relata a ocorrência de terremotos sentidos por moradores de Tristão da Cunha entre os dias 29 e 30 de julho de 2004, registrados também por sismógrafos instalados na ilha. Estes tremores estariam associados à erupção de um vulcão submarino, como concluem os trabalhos de Stewart *et al.* (2005) e O’Mongain *et al.* (2007). Esta confirmação também veio da grande quantidade de púmices encontrados flutuando no mar e depositados em praias de Tristão da Cunha nos dias e meses que se seguiram após os tremores (Hards, 2004). Estes fragmentos foram estudados por Reagan *et al.* (2008), que determinaram a composição fonolítica desse material e que estariam associados a uma rápida cristalização fracionada a partir de um corpo menor de magma máfico,



Figura 5 – Fotografia dos púmices coletados após a erupção submarina de 2004, próxima a Tristão da Cunha. O fragmento da esquerda foi retirado diretamente da superfície da água, coletado por pescadores. O fragmento da direita foi coletado nas praias de Tristão da Cunha. A seta azul indica a orientação das vesículas tubulares do púmice. Imagem de Hards (2009).

1.4.2 – Púmices no Brasil

São poucos os relatos de púmices depositados nas praias do Brasil. O relato mais antigo vem de Hartt (1870), que descreve seixos de púmices retrabalhados pelas ondas, depositados na ilha de Santa Bárbara, Arquipélago dos Abrolhos.

Outro relato é o de Angulo & Vasconcellos (1998) que estudaram púmices depositados em Balneário Barrancos, em Pontal do Paraná, litoral do Paraná. Nesse trabalho, os autores descrevem as características petrográficas desses fragmentos, que possuem cristaloclastos de feldspato alcalino, egrina-augita, biotita e zeólitas. Geoquimicamente, esse material foi definido como de composição traquítica, com altos teores de álcalis em relação à sílica ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=11\%$) e enriquecimento em elementos incompatíveis, como Zr, Rb, Ce e La. Ainda nesse trabalho, os autores discutem a datação relativa desses fragmentos, que teriam se depositado a menos de 1500 anos, segundo a curva de variação do nível relativo do mar no Estado do Paraná (Angulo & Suguio, 1995). Os autores apenas sugerem que a formação destes fragmentos pode estar relacionada à dorsal meso-atlântica, sem definir uma fonte específica.

Dando prosseguimento ao estudo destes púmices de Pontal do Paraná, Daufenbach *et al.* (2018 e 2019) relacionam a geoquímica destes fragmentos com fonolitos e traquitos de ilhas oceânicas, demonstrando que estes púmices têm composição compatível com estas rochas deste ambiente geológico. No trabalho de 2018, os autores comparam o padrão de ETR's destes fragmentos com fonolitos da Ilha da Trindade, enquanto que na pesquisa de 2019 os autores sugerem semelhanças entre púmices do Paraná, África do Sul e Tristão da Cunha.

1.4.3 – A circulação superficial do Atlântico Sul

A circulação superficial dos oceanos é gerada a partir do balanço de forças entre o arrasto causado pelos ventos da baixa atmosfera sobre a água, o efeito Coriolis, que gera a espiral de Eckman e direciona as correntes, e a pressão de gradiente horizontal da água, causada pelo acúmulo de água na superfície a partir do próprio efeito Coriolis. O equilíbrio destas forças gera as correntes geostróficas (Colling, 2001), que completam um giro ao redor de um oceano específico, formando então os giros geostróficos, ou giros subtropicais.

No Atlântico Sul, o Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSAS) é formado principalmente por quatro correntes oceânicas (Corrente de Benguela, Corrente Sul Equatorial, Corrente do Brasil e Corrente Sul Atlântica). Além destas, estão presentes na dinâmica sul atlântica a Corrente das Malvinas, Corrente das Agulhas, Corrente da Angola e Corrente Circumpolar Antártica. (Figura 6).

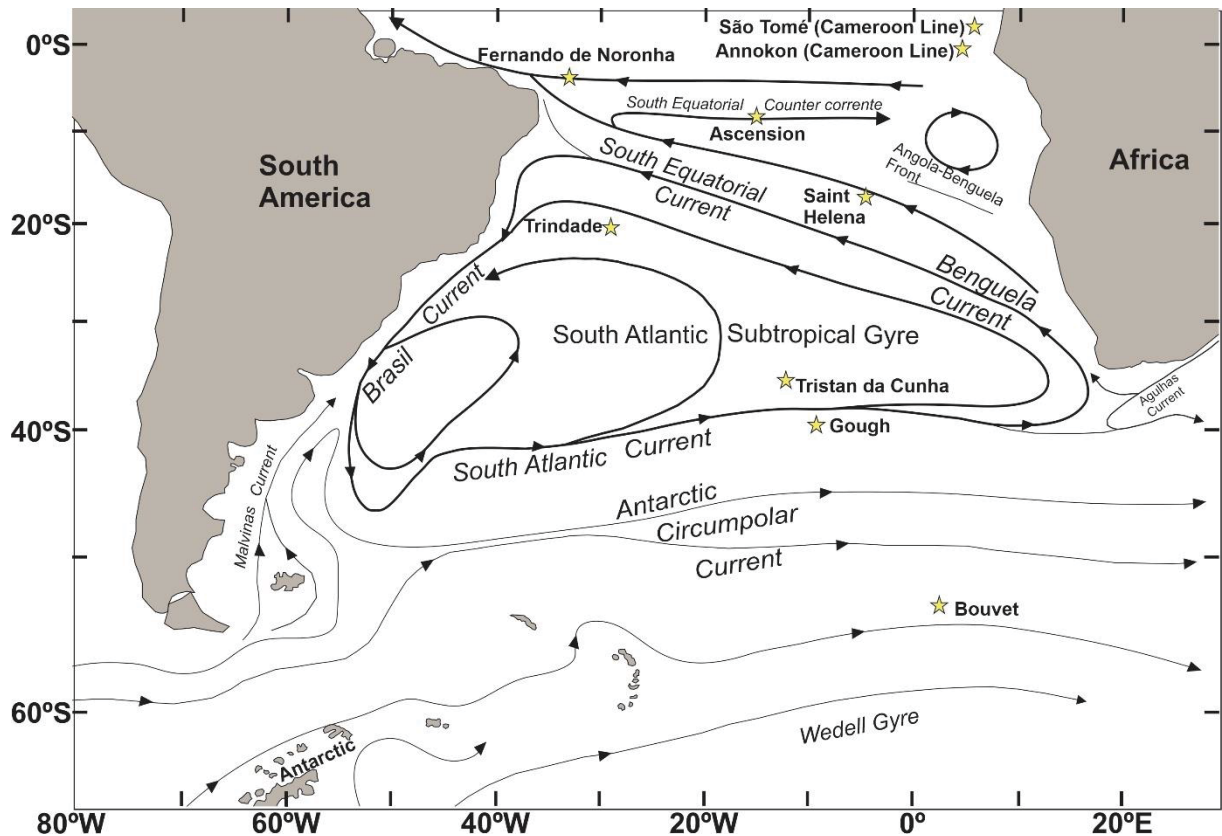


Figura 6 – Mapa esquemático da circulação superficial (0 m) do Atlântico Sul. As ilhas oceânicas abordadas na pesquisa estão assinaladas com estrelas. Editado de Peterson & Stramma (1991).

O limite leste do GSAS é formado pela Corrente de Benguela (CBe), que tem origem nas proximidades do Cabo da Boa Esperança e margeia a costa oeste da África até regiões equatoriais, transportando águas frias subantárticas. Esta corrente possui velocidade que varia de $<11 \text{ cm s}^{-1}$ a 23 cm s^{-1} (Wedepohl *et al.*, 2000) e capacidade de transporte de 18 a 21 Sv (1 sverdrup (Sv) = 1 milhão de $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), nos primeiros 200-300 m de coluna d'água (Stramma & Peterson, 1989; Peterson & Stramma, 1991).

A Corrente das Agulhas (CdA) localiza-se no extremo sul da África e está mais relacionada ao contexto do Oceano Índico, porém sofre e exerce influência nas correntes do Atlântico Sul, transportando águas frias do Índico para o Atlântico (Gyory *et al.*, 2004). Como uma ramificação da corrente de intensificação oeste do Oceano Índico, a CdA possui alta velocidade de fluxo, podendo chegar a 200 cm s^{-1} . (Boebel *et al.*, 1998) e transportar em torno de 70 Sv (Bryden *et al.*, 2005).

A Corrente Sul-Equatorial (CSE), circulando entre $15\text{-}25^\circ\text{S}$ e 4°N , fecha o GSAS a Norte e flui para oeste. A CSE ocupa profundidades de 100 m nas latitudes mais altas, até 500 m nas latitudes mais baixas. A velocidade desta corrente varia

entre 11,3 a 16,4 cm s^{-1} , podendo chegar a 30 cm s^{-1} , e o volume de água transportado varia com a latitude, indo de 20 Sv entre 9° e 10°S, 17 Sv entre 6° a 9°S e 12 Sv entre 1°N a 6°S (Bonhoure *et al.*, 2004).

Na região do Golfo da Guiné localiza-se a Corrente da Angola (CAn), que forma o limite leste de um giro ciclônico localizado no próprio Golfo da Guiné, que pode ser considerado uma ramificação das correntes equatoriais. O volume de água transportado em geral é baixo, variando de 2,6 a 3,7 Sv (Dias, 1983a), com velocidade média de 50 cm s^{-1} (Moroshkin *et al.*, 1970).

À medida que se aproxima da costa brasileira, na latitude de 10°S, a CSE bifurca-se. O ramo Norte margeia o litoral norte do Nordeste brasileiro e denomina-se Corrente norte do Brasil (CNB), enquanto o ramo Sul dá origem à Corrente do Brasil (CB). Esta última forma o limite oeste do Giro Subtropical do Atlântico Sul, sendo, portanto, uma corrente de contorno oeste, estreita, quente, profunda e rápida. Dessa forma, a CB pode atingir até 600 m de profundidade, flui com velocidade de 50 a 60 cm s^{-1} (na latitude 20.5°S) e tem capacidade de transporte que varia com a latitude, indo de 5-6 Sv a 20°S até 19-22 Sv em 38°S, quando se encontra com a Corrente das Malvinas (Peterson & Stramma, 1991; Bischof *et al.*, 2004).

O limite sul do GSAS é formado pela Corrente do Atlântico Sul (CAS), com direções e velocidades semelhantes à Corrente Circumpolar Antártica (CCA), fluindo na direção leste, o que dificulta a definição dos seus limites no oceano. A CAS e a CCA são separadas pela Frente Subtropical, localizada entre 35 e 45°S, onde a temperatura da superfície do mar (TSM) diminui de 12°C para 7-8°C e a salinidade decresce de 34,9 para 34,6 ou menos (Smith *et al.* 2004). A velocidade da CSA pode variar de 20 cm s^{-1} próxima à Bacia Argentina, até 13 cm s^{-1} no meridiano de Greenwich, transportando de 30 a 37 Sv (Guhin *et al.*, 2003).

A Corrente Circumpolar Antártica (CCA) flui na direção leste a baixas velocidades, em torno de 20 cm s^{-1} , impulsionada pelos ventos fortes do Oeste (*westerlies*) que sopram nesta região. A CCA tem largura aproximada de 2000 km e ocupa profundidades que podem variar de 2000 a 4000 m. Devido a isso, pode transportar grande volume de água, em média 100-150 Sv. No Atlântico Sul se encontra em latitudes mais altas que 35-45°S (Smith *et al.* 2004).

A Corrente das Malvinas (CM) é uma ramificação da CCA formada após a passagem desta última pelo Estreito de Drake. A CM flui na direção norte, margeando a costa da Argentina até a região do estuário do Rio da Prata, quando se encontra

com a CB. As medidas de volume variam de 24 Sv, dentro dos primeiros 1000 m, a 60 Sv, considerando os primeiros 2000 m, e a velocidade média é de 40 cm s⁻¹ (Peterson, 1992).

1.4.4 – Ilhas oceânicas

A maioria da atividade vulcânica no Planeta Terra (aproximadamente 90%) está restrita às margens convergentes e divergentes das placas tectônicas. O restante das atividades se concentra nas porções intraplaca, tanto continentais quanto oceânicas. Nas regiões oceânicas, as lavas do vulcanismo intraplaca, que geram cadeias de montanhas submarinas ou platôs, podem representar entre 5 e 25% desta crosta (Wilson, 2007).

A explicação para a formação destas cadeias submarinas tem sido alvo de debate. O modelo que por anos foi o mais aceito é o modelo de *hotspot* ou plumas mantélicas, desenvolvido por Wilson (1963) e reafirmado por Morgan (1971). Segundo este modelo, rochas anormalmente quentes do limite núcleo-manto, em uma fonte fixa (*hotspot*), ascendem até o limite astenosfera-litosfera, onde encontram o manto superior, depletado, e iniciam a fusão parcial da base desta camada. O magma gerado nesse ponto ascende e atravessa a crosta oceânica (ou continental), aproveitando grandes zonas de fratura, e emerge na superfície da crosta, gerando o vulcanismo conhecido. Paulatinamente, com a movimentação da placa, o vulcão inicialmente gerado se afasta do ponto de ascensão do magma, vindo a se extinguir, enquanto outro vulcão se forma a partir do “novo” centro de extravasamento do magma ascendente, e assim sucessivamente, gerando as cadeias retilíneas progressivas observadas.

Porém, como processo natural e vital para o avanço da ciência, outro modelo tem sido levantado para contrapor o paradigma das plumas mantélicas. Este modelo, denominado Processos de Tectônica de Placas, do inglês *Plate Tectonics Process* (PTP), começa a ser formulado a partir dos anos 90, encabeçado principalmente por Gillian Foulger e Don Anderson. A teoria PTP exclui a necessidade de pontos anormalmente quentes no interior da Terra, concentrando os processos de fusão parcial e geração de magmas tipo OIB no manto superior. Nesta camada terrestre, o manto constantemente depletado pelos processos de fusão parcial nas margens divergentes é heterogeneizado pela entrada de basalto, materiais terrígenos e voláteis (H₂O e CO₂) nas zonas de Benioff. Estas lascas colisionais empurradas para o limite

litosfera-astenosfera (denominado de “perisfera” por Anderson, 1995), carregam estruturas geradas durante a colisão, como extensas zonas de falha e sutura, que posteriormente podem servir de regiões de descompressão adiabática, gerando fusão parcial (Anderson, 1995; Meibom & Anderson, 2003). Durante este processo, outro material carregado para o manto é o eclogito, a forma de alta pressão do basalto, que é empurrado em meio ao manto peridotítico. Estudos como de Yaxley (2000) demonstram que o *liquidus* do eclogito está abaixo do *solidus* do peridotito, o que pode ocasionar a fusão parcial do primeiro. Segundo o mesmo estudo, misturas entre eclogito e peridotito da ordem de 30:70 podem gerar maior quantidade de material fundido do que uma fonte peridotítica isoladamente, o que poderia explicar a grande quantidade de magma gerado em LIP's (Large Igneous Provinces).

Dados isotópicos de rochas de ilhas oceânicas apresentam razões compatíveis com eventos orogênicos mais antigos (Hofmann & White, 1982). A interpretação destes dados, segundo Foulger (2015), seria mais simples com a teoria PTP, que considera que as lascas de subducção entrariam em fusão no próprio manto superior, ao contrário da teoria de plumas mantélicas, onde o material crustal teria que ser carregado até o limite núcleo-manto sem fundir, e apenas depois de chegar a este limite, fundir e gerar os *hotspots*.

Independente da teoria, são nesses ambientes, objetos de grande debate, onde afloram e extravasam os *Ocean Islands Basalts (OIB)*. Estes basaltos diferem geoquimicamente dos basaltos tipo MORB (Mid Ocean Ridge Basalts) em termos de assinaturas de elementos traço e assinaturas isotópicas. Porém, nas variedades de OIB, também ocorrem basaltos toleíticos, que podem estar relacionados com o início da formação da ilha oceânica que, contudo, dão espaço aos basaltos alcalinos, dominantes nesses ambientes. A série alcalina, característica de ilhas oceânicas, pode gerar duas tendências de cristalização, sendo uma insaturada em sílica, cujos termos finais félsicos possuirão feldspatoides, geralmente nefelina em fonolitos, ou outra supersaturada em sílica, cujos termos finais serão riolitos alcalinos (pantalleritos e comenditos). A série insaturada é a mais comum. (Wilson, 2007).

No contexto do Atlântico Sul, diversos trabalhos estudam estas ilhas, separada ou conjuntamente, pela ótica petrológica e geoquímica. Baker (1973) faz o primeiro estudo que compila o conhecimento acerca destas ilhas até então, apresentando suas características geoquímicas e separando-as em quatro grupos, reunidos pela alcalinidade. O grupo 1 é levemente alcalino a transicional, e fazem

parte desse grupo as ilhas Bouvet e Ascensão. O grupo 2 é o das ilhas moderadamente alcalinas, no caso Tristão da Cunha, Gough e Santa Helena. Já o grupo 3 engloba as ilhas mais fortemente alcalinas, Fernando de Noronha, Trindade, ilhas da Linha Camarões. O grupo 4 é formado apenas pelos rochedos de São Pedro e São Paulo, que não são vulcânicos.

Weaver (1987) compara as assinaturas geoquímicas dos elementos traço das ilhas Bouvet, Ascensão, Tristão da Cunha, Gough e Santa Helena, destacando a heterogeneidade presente nas fontes dessas ilhas, que teriam mais ou menos contaminação por crostas oceânicas antigas subductadas e, posteriormente, Weaver (1990) compara estes resultados com as ilhas de Trindade e Fernando de Noronha.

Mais recentemente, Jeffery & Gertisser (2018) abordam especificamente as rochas peralcalinas félsicas relacionadas às ilhas oceânicas de todo o Oceano Atlântico, demonstrando que os processos magmáticos envolvidos nesses sistemas incluem extensa cristalização fracionada em sistema aberto derivado de magmas máficos mantélicos, com contaminação crustal e mistura entre magmas gerados no próprio processo de fracionamento.

Separadamente, existem diversos trabalhos que abordam aspectos petrológicos e geoquímicos sobre as ilhas oceânicas do Atlântico Sul. As ilhas são detalhadas a seguir.

1.4.4.1 Ilha Bouvet

Localizada no extremo sul do Atlântico Sul, na junção tríplice entre as placas Sulamericana, Africana e Antártica, a ilha norueguesa Bouvet é recoberta quase inteiramente por uma espessa camada de gelo, o que dificulta a pesquisa sobre a geologia. Contudo, trabalhos anteriores, como Verwoerd *et al.* (1976) e Prestvik (1982) classificam as rochas das porções aflorantes da ilha como sendo compostas por basaltos alcalinos, hawaiiitos, mugearitos, benmoreitos, traquitos levemente peralcalinos e riolitos (Figura 7). Petrograficamente, os basaltos contêm fenocristais de plagioclásio com alto teor de anortita (An_{88}) e, em menor quantidade, clinopiroxênio e olivina (Fo_{80}) (Imsland *et al.*, 1977). Na matriz ocorrem os mesmos minerais, com adição de feldspato alcalino intersticial. As rochas intermediárias possuem a mesma paragênese, mudando apenas a composição do plagioclásio, mais sódico. As rochas félsicas são compostas majoritariamente por feldspato alcalino, como fenocristais e

olivina, clinopiroxênio e anfibólio sódico na matriz. Quartzos também é raramente encontrado na matriz conjuntamente ao anfibólio sódico (Imsland *et al.*, 1977).

As idades referentes às rochas da ilha Bouvet variam de <1,4 Ma (Prestvik *et al.*, 1999) a <0,7 Ma (Verwoerd, 1972). Contudo, entre os anos de 1955 e 1957 uma pequena plataforma se formou na costa oeste da ilha, a qual teria se originado a partir de soerguimento causado por uma erupção vulcânica (Baker & Tomblin, 1964).

1.4.4.2 Ilha Gough

Situada na latitude 40°19' e longitude 9°56', a Ilha Gough aflora 3,5 km acima do leito oceânico e atinge altitudes de 910 m. Possui rochas que variam desde basaltos picríticos a egrina-augita traquitos. Le Maitre (1962) apresenta o primeiro mapa geológico e divisão estratigráfica das sequências vulcânicas da Ilha Gough, as quais teriam sido geradas em eventos alternados de erupções basálticas e traquíticas. A estratigrafia da ilha, definida primeiramente por Le Maitre (1962) e pouco modificada por Le Roex (1985), foi caracterizada posteriormente por Maund *et al.* (1988), quando estes autores utilizaram datações por $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ para agrupar as unidades. Dessa forma, Maund *et al.* (1988) definem quatro fases vulcânicas na ilha, sendo a primeira dominada pelos basaltos do *Older Basalts Group* (2,55-0,5 Ma), acompanhados por uma fase menor, subsequente caracterizada por intrusões traquíticas. Estas são seguidas por um período erosivo de aproximadamente 0,3 Ma. Após esta fase, segue-se um período dominado por traquitos, pertencentes ao *Trachyte Extrusives* (~0,2 Ma) e cessando com a erupção do *Edinburgh Peak Basalts*, há ~0,1 Ma.

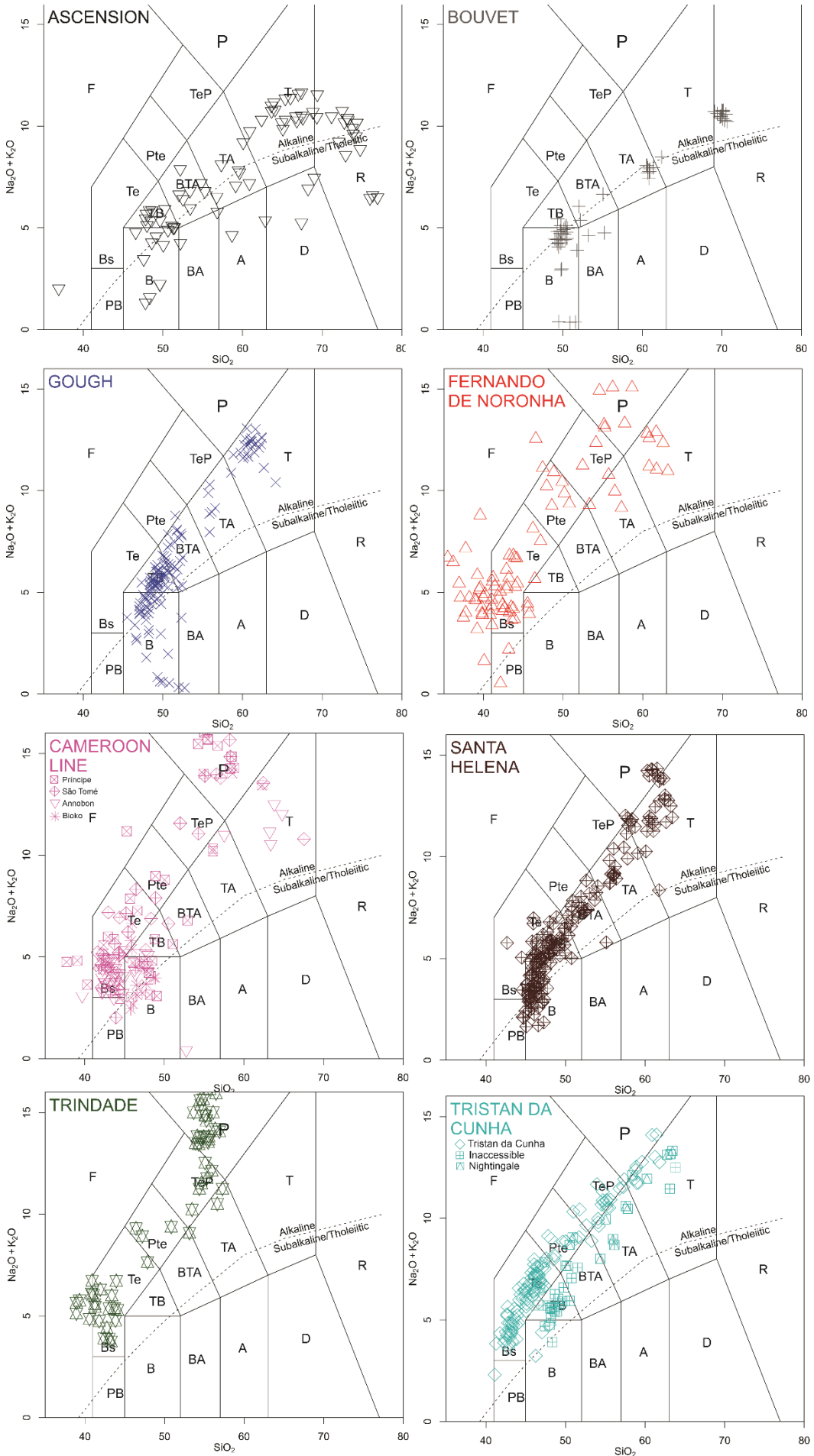


Figura 7 – Diagramas TAS (Total álcalis-sílica) de Le Bas *et al.* (1986) com a classificação de cada ilha abordada nesse estudo, apresentando a linha que divide as amostras entre séries alcalina e subalcalina/teofítica, de acordo com a classificação de Irvine & Baragar (1971). Abreviações: PB: picrobasalto; B: basalto; BA: andesito basáltico; A: andesito; D: dacito; R: riolito; F: foidito; BS: basanita; TB: traquibasalto; BTA: traquiandesito basáltico; TA: traquiandesito; T: traquito; Te: tefrito; PTe: fonotefrito; TeP: tefrifonolito; P: fonolito. Referências: **Ascensão**: Harris (1983), Weaver *et al.* (1987), Halliday *et al.* (1995), Weaver *et al.* (1996), Kar *et al.* (1998), Jicha *et al.* (2013), Chamberlain *et al.* (2016); **Bouvet**: Verwoerd *et al.* (1976), Imsland *et al.* (1977), Prestvik (1982); **Fernando de Noronha**: Weaver *et al.* (1990), Halliday *et al.* (1995), Lopes & Ulbrich (2015), Lopes (2002); **Gough**: Le Roex (1985), Weaver *et al.* (1987); **Linha Camarões**: Fitton & Hughes (1977), Llotard *et al.* (1982), Fitton (1987), Halliday *et al.* (1995), Yamgouot *et al.* (2016); **Santa Helena**: Baker (1969), Weaver *et al.* (1987), Chaffey *et al.* (1989), Kawabata *et al.* (2011); **Trindade**: Weaver *et al.* (1990), Marques *et al.* (1999), Bongioiolo *et al.* (2015); **Tristão da Cunha**: Weaver *et al.* (1987), Le Roex *et al.* (1990), Cliff *et al.* (1991), Baker *et al.* (1964).

As rochas da ilha formam sequência contínua, completa, de série alcalina insaturada em sílica, variando de picrobasaltos a egirina-augita traquitos (Le Roex, 1985, Figura 7). Le Roex (1985) descreve seis tipos de rochas. Os picrobasaltos, que compõem o termo menos evoluído, com fenocristais de olivina e clinopiroxênio disseminados em matriz fina a média composta por clinopiroxênio, feldspato alcalino, minerais opacos e apatita. Os denominados ‘basaltos piroxênio-olivina faneríticos’ possuem plagioclásio como fenocristal, além da olivina e do clinopiroxênio, indicando uma evolução a partir dos basaltos picríticos. A matriz é composta por feldspato alcalino, clinopiroxênio, olivina, titanomagnetita, ilmenita e apatita. Os basaltos afíricos/porfiríticos finos possuem uma paragênese mineral semelhante aos ‘basaltos piroxênio-olivina faneríticos’, porém com um teor maior de plagioclásio, como fenocristal, e de feldspato alcalino e apatita, na matriz. Os traquiandesitos possuem como fenocristais o plagioclásio, clinopiroxênio, olivina, ilmenita, titanomagnetita e apatita disseminados em matriz composta majoritariamente por plagioclásio e feldspato alcalino, com minerais opacos e ferro-magnesianos subordinados. Os traquitos têm como fenocristais feldspato alcalino e plagioclásio; minoritariamente ocorrem fenocristais de clinopiroxênio, biotita e apatita. Na matriz ocorre principalmente feldspato alcalino, com titanomagnetita e olivina subordinadas. Por fim, o autor descreve ainda os egirina-augita traquitos, compostos em grande parte por feldspato alcalino, mas também por egirina-augita, olivina (faialita), magnetita, apatita acicular e sodalita em alguns casos.

1.4.4.3 Grupo Tristão da Cunha.

O grupo Tristão da Cunha compreende um conjunto de três ilhas, denominadas Tristão da Cunha, Inaccessible e Nightingale, as quais afloram a 3,5 km do leito oceânico e cujo ponto culminante, localizado na ilha Tristão da Cunha, atinge 2.062 m acima do nível do mar. Das três, a principal é Tristão da Cunha, cuja área aproximada é de 100 km². Esta possui cerca de 80% de suas rochas aflorantes classificadas como máficas alcalinas insaturadas em sílica, como basanitos e traquibasaltos. Cerca de 15% são constituídas por rochas intermediárias classificadas como fonotefritos e traquiandesitos e apenas 5% são de composição félsica, cujo termo mais evoluído se restringe aos tefrifonolitos (Figura 7). As datações relativas à ilha Tristão da Cunha, feitas por Hicks *et al.* (2012) utilizando o método ⁴⁰K/⁴⁰Ar, determinam idades para o cone principal da ilha entre 0,2 e 0,1 Ma, mas que continua ativo até o presente, já que em 1961 foi registrada uma erupção cujas lavas teriam composição traquiandesítica (Le Roex, 1990).

A segunda maior ilha do grupo, Inaccessible, está localizada a 35 km a sudoeste da ilha principal, abrange área de 14 km², atingindo altitudes de até 550 m. Devido à extensa plataforma circundante, que atinge profundidades de no máximo 200 m, Baker *et al.* (1964) inferiram que o tamanho original do vulcão de Inaccessible tenha sido muito maior do que a ilha remanescente, cujo volume estimado por Gass (1967) tenha sido 90-95% maior que o atual. Petrograficamente, as rochas variam de picrobasaltos, com fenocristais de clinopiroxênio, olivina (Fo₈₅) e plagioclásio (An₆₀), traquibasaltos e, em menor quantidade, traquitos, compostos por feldspato alcalino, plagioclásio, biotita e egirina-augita. Geoquimicamente se diferenciam pouco em relação às rochas de Tristão da Cunha, sendo levemente menos alcalinas (Figura 7). As idades obtidas por Gass (1967), utilizando o método ⁴⁰K/⁴⁰Ar em rocha total, concentram-se em torno dos 3 Ma.

A menor ilha do grupo, Nightingale, compreende um pequeno arquipélago de três ilhas (Nightingale, Middle e Stoltenhoff) que possuem área somada de 2,5 km² e atinge altitude de no máximo 350 m em Nightingale. Na estratigrafia das ilhas, definida por Baker *et al.* (1964), encontra-se sequência semelhante, constituída por rochas piroclásticas compostas por cinzas e aglomerados, recobertos por derrames traquíticos. Esta sequência, denominada *Older Pyroclastic Sequence*, é cortada por diques de traquibasaltos e intrudida por *plugs* traquíticos. Esta unidade passa por fase

erosiva e, posteriormente, é novamente recoberta por nova unidade vulcânica, dessa vez sequências piroclásticas variando de cinzas a aglomerados, intercaladas com derrames traquíticos, denominadas *Younger Pyroclastic Sequence*. Esta sequência não é cortada por diques e possui restos vegetais depositados junto às cinzas. Gass (1967), utilizando o método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ em rocha total, determinou idades de 18 Ma às rochas da *Older Pyroclastic Sequence*, o que tornaria Nightingale a ilha mais antiga do grupo. Contudo, Bjørk *et al.* (2011), através de métodos indiretos, datam a *Younger Pyroclastic Sequence* como sendo mais antiga do que 37,000 cal yr BP e possivelmente mais jovem do que 45,000 cal yr BP, tendo, portanto, uma possível erupção ocorrida no Pleistoceno Inferior. Os traquitos de Nightingale possuem fenocristais de feldspato alcalino e, em menor quantidade, de plagioclásio, egirinaugita e titanoaugita. Geoquimicamente são insaturados em sílica e contêm nefelina normativa (Baker *et al.*, 1964).

1.4.4.4 Ilha da Trindade

A Ilha da Trindade aflora a cerca de 5 km acima do leito marinho, atingindo altitudes de 600 m. Conjuntamente ao pequeno arquipélago de Martim Vaz, localizado 50 km a leste da Ilha, forma o termo mais oriental de uma cadeia de montes submarinos, denominada Cadeia Vitória-Trindade (Almeida, 1961). São reconhecidas cinco unidades litológicas distintas, descritas por Almeida (1961), as quais ainda são utilizadas atualmente. São elas, em ordem cronológica, da mais antiga para a mais nova: Complexo Trindade, Sequência Desejado, Formação Morro Vermelho, Formação Valado e Formação Vulcão do Paredão. Todas as unidades são constituídas por rochas vulcânicas insaturadas em sílica, representadas por termos alcalino-sódicos, que variam de nefelinitos a fonolitos (Figura 7).

Datações pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ em rocha total obtidas por Cordani (1970) e Pires *et al.* (2016) inserem a atividade vulcânica da ilha em um intervalo entre 3,9 a 0,25 Ma. A unidade mais antiga, Complexo Trindade, possui idades entre 3,9 e 2,55 Ma. Esta representa a parte basal da ilha e possui o maior volume de rochas. É composta por rochas piroclásticas com composição nefelinítica (em menor quantidade) e fonolíticas e grande conjunto de estruturas vulcânicas como domos, *necks* e diques de composição fonolítica, além de espessas camadas de depósitos piroclásticos.

A Sequência Desejado é a segunda unidade mais antiga da Ilha, inserida no intervalo entre 1,98 e 1,54 Ma (Cordani, 1970; Pires *et al.*, 2016), sendo composta em grande parte por derrames nefeliníticos com fenocristais de olivina, intercalados com derrames fonolíticos e fonotefritos. Associados aos derrames são encontrados níveis piroclásticos intercalados.

A terceira unidade a se formar, Formação Morro Vermelho, compreende idades entre 1,18 e 1,11 Ma (Cordani, 1970; Pires *et al.*, 2016) e é composta por rochas ultrabásicas com extensos derrames de lavas nefeliníticas com fenocristais de olivina e depósitos piroclásticos. Representa uma única e continuada manifestação vulcânica.

A penúltima unidade a se formar na Ilha é a Formação Valado (idades isócronas à Formação Morro Vermelho), a qual compõe-se por derrames de nefelinitos e depósitos piroclásticos (Pires & Bongioiolo, 2016; Almeida, 1961).

A última unidade encontrada na ilha, a Formação Vulcão do Paredão, é datada em 0,25 Ma (Pires *et al.*, 2016). Trata-se de um cone de escórias ainda preservado, composto essencialmente por materiais piroclásticos (tufos, lúpilli-tufos, tufo-brechas) de composição nefelinítica com algumas intercalações de lavas ultrabásicas altamente vesiculadas (Pires & Bongioiolo, 2016; Almeida, 1961).

1.4.4.5 Santa Helena

A ilha de Santa Helena (local onde Napoleão Bonaparte foi exilado entre os anos de 1816 e 1821) aflora a 4 km acima do leito oceânico e cujo ponto culminante encontra-se a 822 m acima do nível do mar. Compreende uma suíte alcalina contínua, representada por rochas que variam desde picrobasaltos, basaltos alcalinos e basanitos até fonolitos e traquitos. Grande parte (70-80%) das rochas aflorantes são de composição máfica alcalina, com fenocristais de augita, olivina (Fo₈₀₋₇₇) e plagioclásio (An₈₀₋₆₇). Cerca de 15-25% das rochas são constituídas por traquibasaltos, cujos fenocristais são representados por olivina (Fo₆₉₋₅₄) e plagioclásio sódico. Cerca de 4% das rochas são formadas por traquiandesitos que contêm fenocristais de olivina (Fo₃₁), plagioclásio sódico, titanogaugita e apatita. Apenas 1% das rochas são mais evoluídas, caracterizadas por traquitos, com fenocristais de feldspato alcalino e faialita (Fo₀), e por fonolitos, compostos por feldspato alcalino, egirina, augita, enigmatita e nefelina (Baker *et al.* 1969) (Figura 7).

A ilha está dividida em dois centros eruptivos, datados primeiramente por Baker *et al.* (1967) e posteriormente por Chaffey *et al.* (1989), ambos utilizando o método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$. Ao centro mais antigo, localizado na porção nordeste da ilha, foi atribuída idade de 11,3-11,4 Ma. Já o centro mais jovem, que compreende a porção central e sudeste de Santa Helena, possui idades entre 11,3-8,4 Ma, e que está separada do centro nordeste por um período erosivo de cerca de 0.03 Ma.

1.4.4.6 Ascensão

A ilha de Ascensão aflora a aproximadamente 4 km acima do leito oceânico e atinge altitudes de 859 m. Por ter sido descrita desde Darwin (1845), é a mais estudada dentre as ilhas oceânicas do Atlântico Sul. Mais da metade da ilha (cerca de 57%) é composta por rochas vulcânicas efusivas, com série transicional a subalcalina, variando entre basaltos, traquitos e riolitos (Figura 7), enquanto o restante é formado por depósitos piroclásticos (Harris, 1983).

Os traquitos e riolitos alcalinos (de composição comendítica) são encontrados nas regiões centrais e leste da ilha, nos denominados Complexo Félsico Central e Complexo Félsico Leste. Ocorrem como expressivos derrames e domos, acompanhados por depósitos piroclásticos de mesma composição, incluindo camadas de púmices. Petrograficamente, compõe-se por feldspato alcalino, plagioclásio sódico, egrina-augita e riebeckita, além de conterem quartzo normativo (Harris, 1983; Daly, 1925).

Os derrames basálticos são encontrados por toda a ilha, inclusive em níveis dentro dos complexos félsicos central e leste. Variam em estilo efusivo, de derrames do tipo *pahoehoe* a *A'a'*, formando inclusive cones de escórias (Daly, 1925; Nielson & Sibbett, 1996). Petrograficamente, as rochas são geralmente afaníticas. Quando faneríticas, possuem em sua composição plagioclásio e olivina, e, em menor quantidade, clinopiroxênio e óxidos de Fe-Ti (Weaver *et al.*, 1996).

As rochas piroclásticas são originadas a partir de erupções tanto félsicas quanto basálticas. Os depósitos localizados na região oeste da ilha são dominados por piroclásticas básicas, que variam de tufos a lapilitos. Já nas porções centrais ocorrem piroclásticas tanto básicas quanto félsicas. Nos entornos do Green Mountain são encontrados depósitos de fluxo piroclásticos, cuja base é formada por obsidiana

a partir de fluxo bem soldado, e no topo são encontrados púmices mal selecionados (Daly, 1925; Atkin *et al.*, 1964).

Outra característica notável da ilha de Ascensão são os xenólitos, geralmente de granulação grossa e que possuem composições que variam de ultramáficos/máficos (peridotitos, dunitos e gabros) a félsicos (sienitos, monzonitos e granitos) (Kar *et al.*, 1998).

As idades obtidas para Ascensão variam de 1,2 a 0,65 Ma, em datações por $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ desde os xenólitos até as lavas. Contudo, Preece *et al.* (2018) datou lavas com idades <1 ka, embora não tenham sido documentados eventos recentes.

1.4.4.7 Fernando de Noronha

O arquipélago de Fernando de Noronha, formado por um total de 21 ilhas, aflora a cerca de 4,2 km acima do leito marinho. É o termo mais oriental de uma cadeia de montes submarinos, denominada Cadeia de Fernando de Noronha. As três formações reconhecidas e descritas por Almeida (1955) permanecem as mesmas desde então, com mudanças apenas nas classificações petrográficas e geoquímicas (Almeida, 2012; Lopes & Ulbrich, 2015) (Figura 7).

A Formação Remédios é composta por depósitos piroclásticos de composição traquítica/fonolítica, os quais são cortados por inúmeros diques de composições variadas (lamprofíricos, tefríticos, basaníticos, traquíticos e traquiandesíticos), além de *plugs* fonolíticos (Almeida, 1955; Ulbrich, 1993). Representa a unidade mais antiga do arquipélago, com idades de 12,5-9,4 Ma, obtidas por Perlingeiro *et al.* (2013) pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, semelhantes aos resultados de Cordani (1970), que obteve idades entre 12,3-8 Ma, pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$.

A Formação Quixabá está situada acima da Formação Remédios, separada desta por um longo período de erosão. Esta unidade é composta basicamente por derrames de composição basáltico-nefelínica, com depósitos piroclásticos de mesma composição associados, ambos cortados por diques de mesma composição. As idades para esta Formação variam de 6,2 a 1,3 Ma (Almeida, 1955; Ulbrich, 1993; Perlingeiro *et al.*, 2013).

A Formação São José representa a manifestação vulcânica mais recente do arquipélago, sendo composta por lavas basaníticas expostas exclusivamente na Ilha

de São José, a NE da ilha de Fernando de Noronha. Esta unidade, definida por Almeida (1955), está separada dos derrames da Formação Quixabá por conter maior número de xenólitos. Contudo, Perlingeiro *et al.* (2013) obtiveram idades de 9,2-9,0 Ma para esta Formação, sendo, portanto, isócrona à Formação Remédios.

A ampla distribuição geoquímica das amostras pertencentes ao arquipélago de Fernando de Noronha (Figura 7), levou Lopes *et al.* (2014) e Lopes & Ulbrich (2015) a reconhecer duas suítes de rochas, relacionadas a fontes magmáticas discretamente relacionadas. A primeira, série sódica, compreende os termos mais alcalinos (basanita-tefrito-fonotefrito-fonolito). A segunda, série moderadamente potássica, compreende os termos menos alcalinos (basaltos alcalinos, traquiandesito basáltico-traquiandesito-traquito).

1.4.4.8 Ilhas da Linha Camarões

A Linha Camarões é uma grande estrutura geológica que se estende por aproximadamente 1600 km na direção NE-SW, abrangendo desde as regiões de crosta continental, onde é formada pelo alinhamento de grandes maciços, alguns ativos, como o Monte Camarões, até as regiões de crosta oceânica, onde se encontram as ilhas Annobon (Pagalú), Príncipe, São Tomé e Bioko (Suh *et al.*, 2003; Déruelle *et al.*, 1991).

A ilha Bioko, é composta inteiramente por rochas ultramáficas e máficas, variando entre picrobasaltos, basanitos, hawaiiitos (traquibasaltos) e mugearitos (traquiandesito basáltico). Possui as idades mais jovens dentre as quatro ilhas, de <1,33 Ma (método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$) (Hedberg, 1969; Aka *et al.*, 2004; Chauvel *et al.*, 2005) (Figura 7).

A ilha de Annobon (Pagalú) tem formação semelhante à Bioko, com rochas majoritariamente máficas (basanitos, traquibasaltos e traquiandesitos), contudo possui também pequenas manifestações de composição traquítica, com afinidade peralcalina (Figura 7). Possui idade $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ de 20 Ma (Déruelle *et al.*, 2007).

A ilha de São Tomé possui maior variedade de rochas, que são classificadas como picrobasaltos, basanitos, tefritos, tefrifonolitos e fonolitos., sendo as rochas de composição máfica mais abundantes (Figura 7). A idade atribuída a São Tomé é de 16 Ma pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ (Déruelle *et al.*, 2007).

A ilha Príncipe, a mais antiga, com idades $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ de 31 Ma (Déruelle *et al.*, 2007), apresenta variedade de rochas semelhantes às da Ilha de São Tomé. A proporção também é semelhante, com maior abundância de rochas máficas em comparação com as rochas félsicas, mais evoluídas. Não obstante, na Ilha Príncipe há maior ocorrência de rochas félsicas, como fonolitos.

Comparando-se as idades atribuídas a cada ilha e sua posição geográfica, a Linha Camarões não apresenta evolução cronológica típica encontrada em cadeias oceânicas. Isto também é observado nas porções continentais da Linha (Lee *et al.*, 1994; Marzoli *et al.*, 2000).

1.5 – MATERIAIS E MÉTODOS

1.5.1 – Levantamento bibliográfico e obtenção de dados

Os dados litogeoquímicos foram obtidos de estudos prévios de diversos autores referentes às ilhas oceânicas do Atlântico Sul. Grande parte desses dados foi compilado através do *site* GEOROC *database* (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>), sendo que estes passaram por refinamento, excluindo amostras com soma total de óxidos maiores maior do que 102% e menor do que 96%.

Além disso, a pesquisa bibliográfica foi fundamental, já que neste estudo são abordados assuntos fora do âmbito da geologia, temas ligados à oceanografia física, mais especificamente à dinâmica de circulação oceânica superficial.

1.5.2 – Levantamentos de campo e amostragem.

Os púmices estudados nesse trabalho pertencem ao acervo do Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Paraná (LECOST-UFPR). Os púmices de Pontal do Paraná foram coletados em trabalhos prévios realizados na região de Balneário Barrancos. Os fragmentos da Bahia foram coletados em trabalhos realizados na Praia de Itacimirim, município de Camaçari.

Os púmices da Ilha da Trindade foram coletados em trabalhos de campo realizados nesta Ilha, quando esta pesquisa estava em sua fase inicial. Neste campo, foram levantadas colunas litoestratigráficas e coletadas amostras para análise petrográfica e geoquímica.

1.5.3 – Simulação de dispersão por correntes marítimas

O estudo dos sistemas de circulação oceânicos ajudou a entender e determinar as correntes oceânicas predominantes no Atlântico Sul. Porém o estudo do comportamento de púmices lançados à deriva precisou de mais ferramentas. Para isso, foi utilizado o site *plasticadrift.org*, desenvolvido por van Sebille *et al.* (2012). Este site foi desenvolvido a partir do estudo da formação de ilhas de lixo que se acumulam em locais específicos nos oceanos. A inserção das coordenadas do ponto de origem dos materiais flutuantes (púmices, no caso desse estudo) gera uma modelagem na qual se mostra o espalhamento geográfico dos fragmentos, carregados pelas correntes marítimas através dos oceanos, durante determinado tempo. A modelagem permite observar como os fragmentos são distribuídos através dos oceanos em período de dez anos.

1.5.4 – Análise petrográfica

A partir das amostras de púmices, foram confeccionadas lâminas delgadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR-UFPR), as quais foram descritas por meio de microscópios petrográficos de luz transmitida do Laboratório de Pesquisas em Microscopia do Departamento de Geologia da UFPR (LAPEM-UFPR). A partir das descrições, foram obtidas fotomicrografias para caracterização das texturas, estruturas e minerais identificados.

1.5.5 – Análises geoquímicas de rocha total

Para a obtenção dos dados geoquímicos, as amostras foram analisadas por meio das técnicas analíticas de fluorescência de raios X (FRX) e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Antes de qualquer procedimento, as amostras de púmices foram polidas para retirar contaminações de quartzo e carbonatos, presentes nas vesículas mais superficiais dos fragmentos, como foi previamente identificado por meio da petrografia macro e microscópica. Para este fim, foi utilizada uma microrretífica *Dremel*.

Foram analisadas quatro (4) amostras de púmices, sendo uma de Pontal do Paraná, uma de Camaçari e duas da Ilha da Trindade, além de dez amostras da Ilha da Trindade, entre rochas piroclásticas e fonolitos. Estas foram preparadas no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas da UFPR (LAMIR-UFPR). Foram submetidas aos processos de britagem, quarteamento e moagem em moinho com panela de Carbetto de Tungstênio (WC). Foram separados 8 g de cada amostra e enviadas para o laboratório *Activation Laboratories Ltd.* (Actlabs), localizado na cidade de Toronto, no Canadá, onde as análises foram realizadas. Como é um laboratório comercial, esta fase da análise não foi acompanhada, mas os detalhes dos procedimentos são descritos no *site* do laboratório (www.actlabs.com).

As análises de FRX são amplamente utilizadas na geoquímica para se determinar as porcentagens de elementos maiores, em termos de óxidos (Si, Ti, Al, Fe_{total}, Mn, Mg, Ca, Na, K, P e LOI). Já a técnica de ICP-MS é utilizada principalmente para determinar teores de elementos traço, principalmente elementos terras raras (ETRs), já que pode determinar concentrações em partes por bilhão (ppb).

1.5.6 – Tratamento estatístico

Para tornar mais robustas as interpretações obtidas a partir dos dados geoquímicos, têm-se a análise estatística como poderosa ferramenta de apoio. Assim sendo, esta pesquisa lançou mão de métodos estatísticos para analisar numericamente os dados geoquímicos dos púmices e das ilhas oceânicas, buscando, dessa forma, estabelecer com qual ilha estes fragmentos flutuantes teriam maior correlação.

Dessa forma, utilizou-se o Coeficiente de correlação de postos de Spearman, também chamado de Rô de Spearman (Rs) (1), para estabelecer as correlações entre diferentes elementos químicos para cada ilha. Utilizou-se a equação:

$$Rs = 1 - \left[\frac{6\sum D^2}{n(n^2-1)} \right] \quad (1)$$

Em que D é a diferença entre a posição no *rank* de cada amostra e *n* é o número de amostras. Para calcular os valores dos coeficientes utilizou-se o software BioEstat 5.3, desenvolvido por Ayres *et al.* (2007).

Foram utilizados para esse cálculo os teores de sete elementos traço incompatíveis, com caráter petrogenético, sendo eles Zr, Nb, Y, Rb, Sr, La e Ce.

Para cada ilha oceânica foram geradas duas matrizes de correlação relacionando os sete elementos: uma matriz levando em consideração as composições apenas da ilha em questão, e outra adicionando-se as composições dos púmices ao conjunto amostral desta ilha. A inserção das quatro amostras de púmices nos cálculos causa variações nos coeficientes de correlação (aqui denominado ΔR_s), a partir das quais é possível determinar a média aritmética simples dessas variações e seu respectivo desvio padrão populacional.

A partir disso, a ilha mais correlacionável com os púmices será a que obtiver médias de ΔR_s mais próximas a zero (o zero representando nenhuma variação) conjuntamente a baixos desvios padrões, indicando que os valores absolutos dos ΔR_s estão próximos ao valor da média.

Outra questão importante a ser salientada é em relação ao R crítico de cada matriz de correlação. Em muitos estudos estatísticos, o R crítico (calculado por Sachs, 1984) determina se o coeficiente de correlação entre um par de variáveis é significativo ou não, dependendo do número total de amostras. Nesses casos, se o coeficiente estiver abaixo desse fator, ele pode ser excluído das análises estatísticas, já que não é significativo. Porém, nesta pesquisa, mesmo que os coeficientes R_s estejam abaixo do R crítico, estes não serão excluídos das análises, já que o objetivo desse método nessa pesquisa é determinar qual o valor dos R_s para cada ilha e o quanto variam estes valores caso os púmices sejam incluídos. Com isso, quando as matrizes de correlação forem apresentadas posteriormente, todos os R_s que estiverem abaixo do R crítico serão indicados, porém não serão excluídos.

2 CAPÍTULO 2 - RESULTADOS

2.1 – ARTIGO

PROVENIÊNCIA DE PÚMICES EM DEPÓSITOS COSTEIROS DO BRASIL: INVESTIGANDO ILHAS OCEÂNICAS DO ATLÂNTICO SUL

Herick Faust Daufenbach¹; Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos¹; Rodolfo José Angulo¹; Maria Cristina Souza¹; Leonardo Mairink Barão¹; Fernanda Avelar Santos¹.

1 Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19001, CEP 81531-980, Curitiba, PR, Brazil

Email: herick.fd@gmail.com (Daufenbach, H.F.); eleonora.gvasconcellos@gmail.com (Vasconcellos, E.M.G.); fitoangulo@gmail.com (Angulo, R.J.); cristinasouza2527@gmail.com (Souza, M.C.); leobaraogeo@gmail.com (Barão, L.M.); fernanda.avelars@gmail.com (Avelar; F.S.).

Resumo

Devido à sua alta flutuabilidade, púmices gerados em erupções explosivas ocorridas em regiões marinhas são frequentemente transportados por correntes marítimas e depositados em litorais de todo o planeta, distante da sua fonte. No Brasil, nas praias de Camaçari (Bahia), Pontal do Paraná (Paraná), e Ilha da Trindade, são encontrados, em meio aos sedimentos costeiros holocênicos, púmices cujo tamanho varia entre 2 a 7 cm de diâmetro. Em lâmina delgada, estes fragmentos de vidro vulcânico são compostos em mais de 90% por vesículas e vidro argilizado, possuem textura fibrosa e estrutura de fluxo, marcada pela orientação das vesículas. Os cristaloclastos são formados por feldspato alcalino, egirina-augita e kaersutita, de granulação fina a média. Com base em análises geoquímicas, possuem altos teores de Na₂O+K₂O (aproximadamente 13%) em relação à sílica (aproximadamente 62%). Além disso, têm forte enriquecimento em elementos LILE (e.g. Rb, Th, U, Nb) e ETRs

leves (La e Ce), depleção em elementos HFSE e ETRs pesados com anomalias negativas de Eu, Ba, Sr, P e Ti, indicando processos avançados de fracionamento geoquímico. As assinaturas geoquímicas das amostras das diferentes localidades se mostram semelhantes, possivelmente pertencendo à mesma fonte e ao mesmo evento vulcânico. Quando se comparam os padrões geoquímicos dos púmices com a geoquímica das ilhas oceânicas do Atlântico Sul, os fragmentos vulcânicos se alinham com a tendência evolutiva do Grupo Tristão da Cunha, possivelmente representando termo mais enriquecido a partir da fonte geradora do sistema magmático deste Grupo. Análises estatísticas determinam que os púmices possuem grau de correlação maior com Tristão da Cunha, corroborando com a geoquímica. O transporte desses fragmentos a partir do Grupo de ilhas até os diferentes pontos da costa do Brasil é fisicamente possível através do Giro Subtropical do Atlântico Sul, sendo transportados pelas correntes Sul Atlântica, de Benguela, Sul Equatorial e do Brasil

Palavras-chave: Vulcanismo alcalino; ilhas oceânicas; geoquímica; correntes oceânicas; Tristão da Cunha; estatística.

2.1.1 Introdução

Púmices são fragmentos de vidro vulcânico altamente vesiculados, gerados em erupções explosivas, principalmente plinianas, que são característicos pela sua peculiar propriedade de flutuar na água, devido à sua baixa densidade, em geral menor que 1g/cm^3 (Fisher & Schmincke, 1984). Estudos experimentais, como de Witham & Sparks (1984), Manville *et al.* (1998) e Fauria *et al.* (2016), demonstram que as vesículas dos púmices são interconectadas e que, se colocados na água, são gradativamente preenchidas até que o fragmento fique saturado e afunde. O tempo necessário para saturar os púmices em água será proporcional ao diâmetro desse fragmento, podendo permanecer flutuando por meses a anos. Com isso, caso sejam lançados ao mar após uma erupção, correntes marítimas podem transportá-los por dezenas de milhares de quilômetros através dos oceanos, podendo alcançar litorais distantes da sua origem (McPhie *et al.*, 1993), em costas de todo o planeta, inclusive em locais onde não há vulcanismo ativo.

Partindo dessa premissa, diversos autores realizaram estudos buscando identificar a fonte de púmices encontrados em praias. Trabalhos como de Frick & Kent

(1984), na África do Sul, Risso *et al.* (2002), na Terra do Fogo, Jokiel & Cox (2003), no Havaí, e Bryan *et al.* (2004), na Austrália, abordam essa temática.

No litoral do Brasil, os relatos sobre púmices são escassos. O mais antigo é feito por Hartt (1870), que encontrou fragmentos depositados nas praias da ilha Santa Bárbara, Arquipélago dos Abrolhos. Frick & Kent (1984) incluem no seu estudo uma amostra que, segundo os autores, é proveniente das praias do Rio de Janeiro (RJ), porém não apresentam as análises dessa amostra. Angulo & Vasconcellos (1998) relatam a ocorrência de púmices com até 2 cm de diâmetro, encontrados em depósitos praias holocênicos de Balneário Barrancos, município de Pontal do Paraná, Paraná, que teriam afinidade geoquímica alcalina.

O Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Paraná (LECOST-UFPR) possui em seu acervo amostras encontradas nas praias de Pontal do Paraná (PR), púmices coletados na Praia de Itacimirim, município de Camaçari, (BA), e fragmentos encontrados na Praia dos Andradas, na Ilha da Trindade (BR).

Como a origem dos púmices do litoral do Brasil ainda não foi definida, este trabalho se propõe a determinar a provável fonte geradora dos fragmentos das localidades de Camaçari (CA), Pontal do Paraná (PP) e da Ilha da Trindade (IT), testando a hipótese de que a origem desses materiais esteja relacionada ao vulcanismo de uma das ilhas oceânicas do Atlântico Sul, já que estas têm afinidade alcalina compatível com a composição dos púmices de PP.

Ilhas oceânicas cujo vulcanismo esteja inativo serão inclusas no estudo, já que movimentos de massa podem transportar depósitos de púmices das encostas para o mar.

Dessa forma, as ilhas oceânicas abordadas nessa pesquisa são as ilhas Bouvet (BO), Gough (GO), Tristão da Cunha (TC), Trindade (TR), Santa Helena (SH), Ascensão (AS), Fernando de Noronha (FN) e ilhas da Linha Camarões (CL) (Figura 1.1)

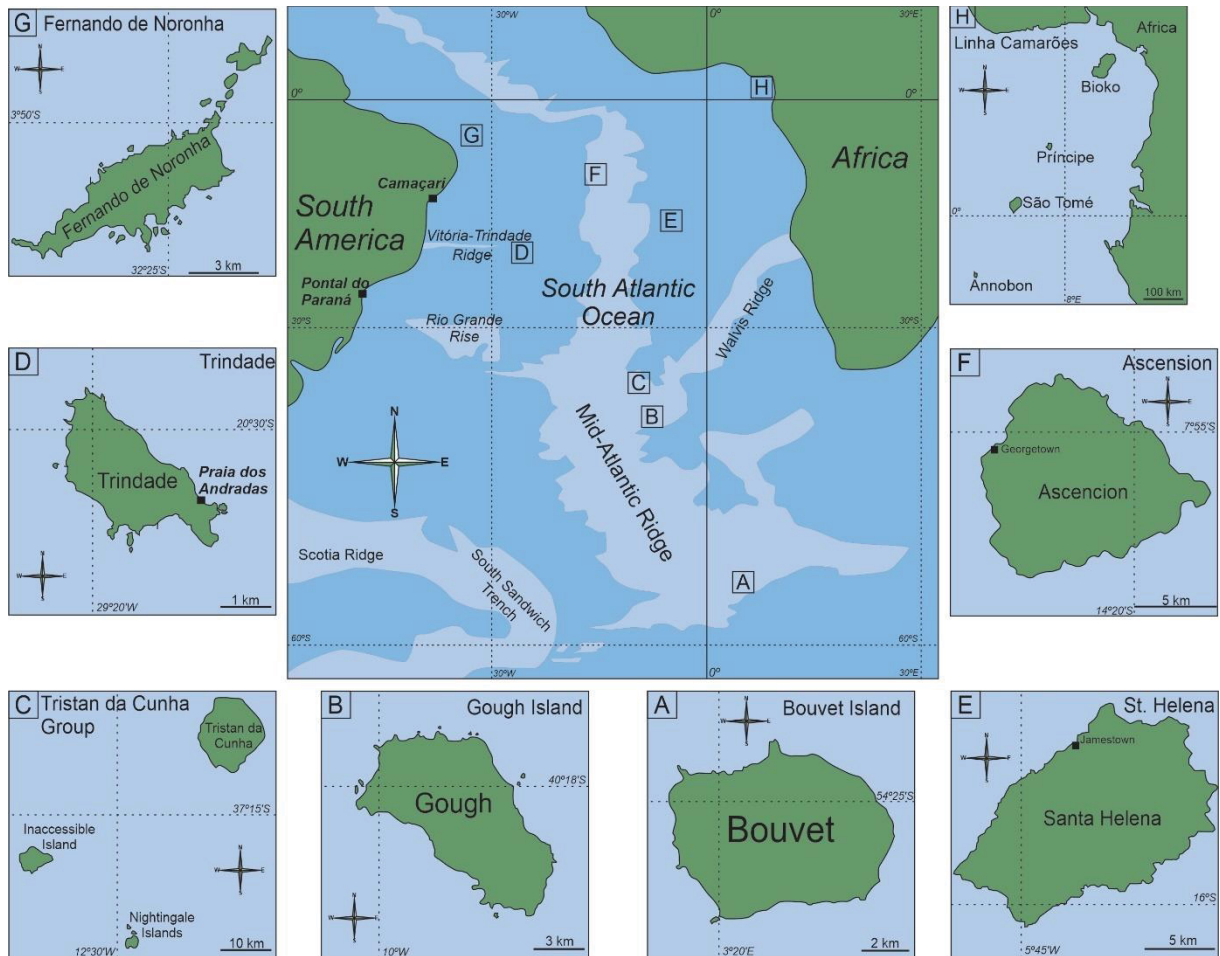


Figura 1.1 – Mapa de localização das ilhas oceânicas do Atlântico Sul e as localidades da Praia dos Andradas (Ilha da Trindade), Ponta do Paraná (PR) e Camaçari (BA). Adaptado de Jeffery & Gertisser (2018).

Como objetivos específicos tem-se a determinação das características petrográficas e litogeoquímicas dos púmices, o reconhecimento das correntes marítimas do Atlântico Sul, a compreensão da geologia e geoquímica das ilhas oceânicas desse oceano e o grau de correlação entre os púmices e estas ilhas.

2.1.2 Contextualização geológica e oceanográfica

Circulação oceânica superficial no Atlântico Sul

As correntes oceânicas superficiais predominantes no Atlântico Sul compõem o chamado Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSAS). Esse sistema de correntes superficiais flui no sentido anti-horário e é composto basicamente por quatro correntes marítimas (Corrente de Benguela, a Corrente (e contracorrente) Sul Equatorial, a Corrente do Brasil e a Corrente Sul Atlântica). Além do GSAS, ocorrem ainda

correntes de menor importância para o presente estudo, como a Corrente das Malvinas, a Corrente das Agulhas e, no extremo sul do Atlântico Sul, a Corrente Circumpolar Antártica (Peterson & Stramma, 1991) (Figura 1.2).

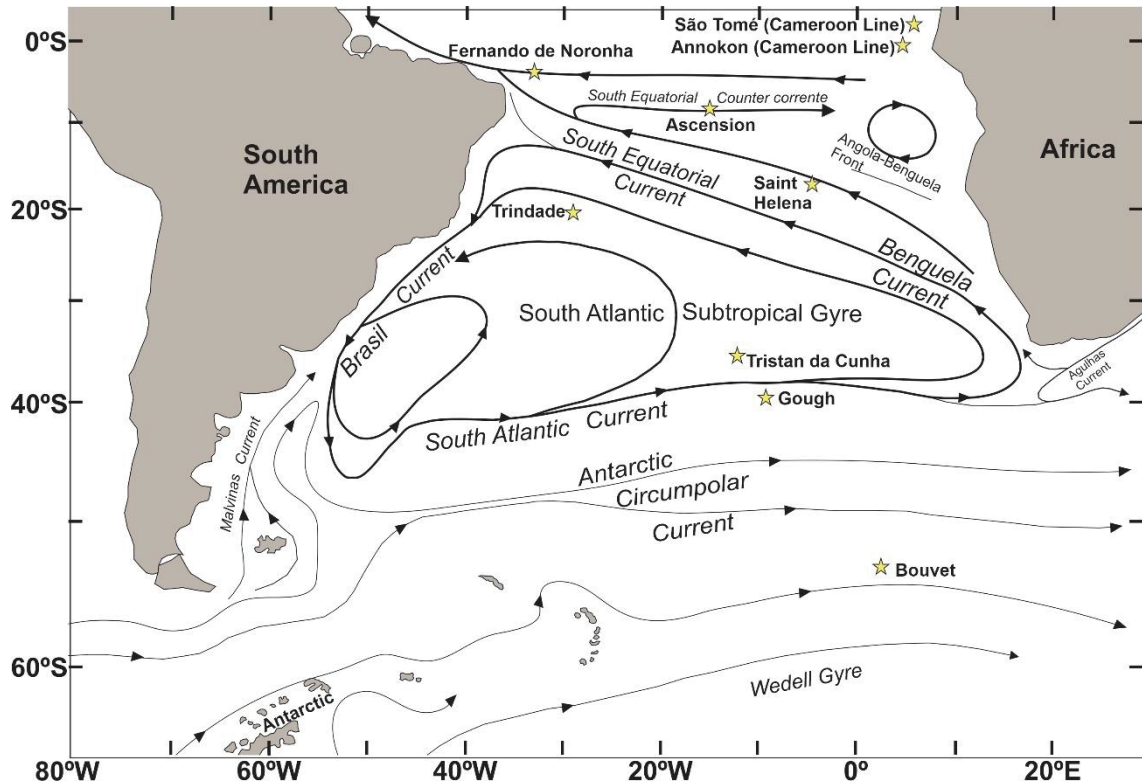


Figura 1.2 – Mapa da circulação superficial (0 m) do Atlântico Sul. As ilhas oceânicas estudadas estão assinaladas por estrelas amarelas. Adaptado de Peterson & Stramma (1991).

Ilhas oceânicas do Atlântico Sul

Bouvet

Localizada no extremo sul do Atlântico Sul, na junção tríplice entre as placas Sulamericana, Africana e Antártica, a ilha norueguesa Bouvet (Figura 1.1A) é recoberta quase inteiramente por espessa camada de gelo, o que dificulta a pesquisa sobre a geologia. Contudo, os trabalhos de Verwoerd *et al.* (1976) e Prestvik (1982) classificam as rochas das porções aflorantes da ilha como basaltos alcalinos, hawaiiitos, mugaritos, benmoreitos, traquitos e riolitos.

As idades referentes às rochas da ilha Bouvet variam de <1,4 Ma (Prestvik *et al.*, 1999) a <0,7 Ma (Verwoerd, 1972). Contudo, entre os anos de 1955 e 1957 uma pequena plataforma se formou na costa oeste da ilha, a qual teria se originado a partir de soerguimento causado por uma erupção vulcânica (Baker & Tomblin, 1964).

Gough

Situada na latitude 40°19' e longitude 9°56', a Ilha Gough (Figura 1.1B) aflora 3,5 km acima do leito oceânico e alcança altitudes de 910 m. Segundo Le Maitre (1962) as rochas da Ilha Gough variam desde basaltos picríticos a egrina-augita traquitos. O autor faz o primeiro mapa geológico e divisão estratigráfica das sequências vulcânicas desta ilha, as quais teriam sido geradas em eventos alternados de erupções basálticas e traquíticas. A estratigrafia da ilha, definida primeiramente por Le Maitre (1962) e pouco modificada por Le Roex (1985), foi melhor caracterizada por Maund *et al.* (1988), que, a partir de datações por ^{40}K - ^{40}Ar , agrupam melhor as unidades. Dessa forma, Maund *et al.* (1988) definem quatro fases vulcânicas na ilha, sendo a primeira dominada pelos basaltos do Older Basalts Group (2,55-0,5 Ma), os quais são acompanhados por uma fase menor subsequente caracterizada por intrusões traquíticas. Estas são seguidas por um período erosivo de aproximadamente 0,3 Ma. Após esta fase, segue-se um período dominado por traquitos, pertencentes ao Trachyte Extrusives (~0,2 Ma) e cessando com a erupção do Edinburgh Peak Basalts, há ~0,1 Ma.

As rochas da ilha formam sequência contínua, completa, de série alcalina insaturada em sílica, variando de picrobasaltos a egrina-augita traquitos (Le Roex, 1985).

Grupo Tristão da Cunha

O Grupo Tristão da Cunha compreende um conjunto de três ilhas, denominadas Tristão da Cunha, Inaccessible e Nightingale (Figura 1.1C), as quais se elevam a 3,5 km do leito oceânico e cujo ponto culminante, localizado na Ilha Tristão da Cunha, atinge 2.062 m acima do nível do mar. Das três, a principal é Tristão da Cunha, composta majoritariamente por basanitos e traquibasaltos, mas também ocorrem fonotefritos, traquiandesitos, e, em menor quantidade, tefrifonolitos e fonolitos (Baker *et al.* 1964). As datações relativas à ilha Tristão da Cunha, feitas por Hicks *et al.* (2012) utilizando o método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, apontam idades para o cone principal da ilha entre 0,2 e 0,1 Ma, mas que continua ativo até o presente, já que em 1961 foi registrada erupção cujas lavas teriam composição traquiandesítica (Le Roex, 1990).

A segunda maior ilha do grupo, Inaccessible, está localizada a 35 km a sudoeste da ilha principal e atinge altitude de até 550 m. Compõe-se por

picrobasaltos, traquibasaltos e, em menor quantidade, traquitos. Geoquimicamente se diferenciam pouco em relação às rochas de Tristão da Cunha, sendo levemente menos alcalinas (Cliff et al, 1991). As idades obtidas por Gass (1967), utilizando $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, concentram-se em torno dos 3 Ma.

A menor ilha do grupo, Nightingale, com altitude máxima de 350 m, faz parte de um arquipélago de três ilhas (Nightingale, Middle e Stoltenhoff). No arquipélago são encontradas duas sequências piroclásticas, denominadas Older Pyroclastic Sequence e Younger Pyroclastic Sequence (Baker et al., 1964) compostas por piroclastos que variam de cinza a aglomerados, recobertos por derrames traquíticos. Gass (1967), utilizando $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, atribui idades de 18 Ma às rochas da Older Pyroclastic Sequence, o que tornaria Nightingale a ilha mais antiga do grupo.

Trindade

A Ilha da Trindade (Figura 1.1D) se eleva a 5 km acima do leito marinho, atingindo altitudes de 600 m. Conjuntamente com o arquipélago de Martim Vaz, localizado 50 km a leste da Ilha, forma o extremo oriental da cadeia de montes submarinos denominada Cadeia Vitória-Trindade (Almeida, 1961). Almeida (1961) reconhece cinco unidades estratigráficas distintas.

Datações pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ feitas por Cordani (1970) e Pires et al. (2016) inserem a atividade vulcânica da ilha em um intervalo entre 3,9 a 0,25 Ma. A unidade mais antiga, Complexo Trindade, possui idades entre 3,9 e 2,55 Ma. Já a Sequência Desejado, segunda mais antiga, está inserida no intervalo entre 1,98 e 1,54 Ma (Cordani, 1970; Pires et al., 2016). Estas unidades são compostas por intercalações entre depósitos piroclásticos de composição nefelinítica e fonolítica e derrames de ambas as composições, sendo que o Complexo Trindade apresenta predominância de composição fonolítica, enquanto a Sequência Desejado tem predominância de termos nefeliníticos.

As três unidades mais recentes, a Formação Morro Vermelho, Formação Valado e Formação Vulcão do Paredão, são compostas por rochas ultrabásicas nefeliníticas, variando apenas nas proporções entre volume de derrame e volume de material piroclástico. Destas três, a Formação Morro Vermelho é a mais antiga e compreende idades entre 1,18 e 1,11 Ma (Cordani, 1970; Pires et al., 2016). Formação Valado possui idades isócronas à Formação Morro Vermelho. A Formação Vulcão do Paredão, possui idades que variam entre 0,44 a 0,06 Ma (Pires et al., 2016).

Santa Helena

A ilha de Santa Helena eleva-se a 4 km acima do leito oceânico e atinge altitude de 822 m (Figura 1.1E). Compreende uma suíte alcalina contínua, representada por rochas que variam desde picrobasaltos, basaltos alcalinos e basanitos até fonolitos e traquitos, distribuídos em sequências formadas a partir de dois centros eruptivos. O mais antigo e de menor extensão, localizado na porção NE da ilha, é formado por rochas piroclásticas intercaladas com derrames de basalto alcalino porfirítico. Esta unidade é quase inteiramente recoberta por uma segunda unidade, mais recente, cujo centro eruptivo se encontra na porção SE da ilha, e que estão separadas por um período de 0,03 Ma de erosão (Baker *et al.* 1969). A sequência gerada pelo centro SE é composta por rochas piroclásticas intercaladas com derrames que podem variar na composição, de basaltos alcalinos e picrobasaltos a fonolitos e traquitos (Baker *et al.* 1969).

As datações realizadas na ilha são principalmente de Baker *et al.* (1967) e Chaffey *et al.* (1989), ambos utilizando o método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$. O centro mais antigo, localizado na porção NE da ilha, tem idades de 11,3-11,4 Ma. Já o centro SE, apresentou as idades mais jovens, entre 11,3-8,4 Ma.

Ascensão

A ilha de Ascensão eleva-se a aproximadamente 4 km acima do leito oceânico e atinge altitude de 859 m (Figura 1.1F). Mais da metade da ilha (57%) é composta por rochas vulcânicas efusivas, com série transicional a subalcalina, variando entre basaltos, traquitos e riolitos, enquanto o restante é formado por depósitos piroclásticos (Harris, 1983).

Os traquitos e riolitos alcalinos (de composição comendítica) são encontrados nas regiões centrais e leste da ilha, nos denominados Central Felsic Complex e Eastern Felsic Complex. Ocorrem como expressivos derrames e domos, acompanhados por depósitos piroclásticos de mesma composição, incluindo camadas de púmices. (Harris, 1983; Daly, 1925). Os derrames basálticos e cones de escórias são encontrados por toda a ilha, inclusive em níveis dentro dos complexos félsicos central e leste. (Daly, 1925; Nielson & Sibbett, 1996).

As rochas piroclásticas são originadas a partir de erupções tanto félsicas quanto basálticas. Os depósitos localizados na região oeste da ilha são dominados

por piroclásticas básicas, que variam de tufos a lapilitos. Já nas porções centrais ocorrem piroclásticas tanto básicas quanto félsicas. Nos entornos do Green Mountain são encontrados depósitos de fluxo piroclásticos, cuja base é formada por obsidiana a partir de fluxo bem soldado, e no topo são encontrados púmices mal selecionados (Daly, 1925; Atkins *et al.*, 1964).

Outra característica notável da ilha de Ascensão são os xenólitos, geralmente de granulação grossa e que possuem composições que variam de ultramáficos/máficos (peridotitos, dunitos e gabros) a félsicos (sienitos, monzonitos e granitos) (Kar *et al.*, 1998).

As idades obtidas para Ascensão variam de 1,2 a 0,65 Ma, em datações por $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Contudo, Preece *et al.* (2018) dataram lavas com idades <1 ka, embora não tenham sido documentados eventos recentes.

Fernando de Noronha

O arquipélago de Fernando de Noronha (Figura 1.1G), formado por 21 ilhas, eleva-se a cerca de 4.2 km acima do leito marinho. É o termo mais oriental de uma cadeia de montes submarinos, denominada Cadeia de Fernando de Noronha. O arquipélago é formado por três unidades definidas por Almeida (1955).

A Formação Remédios é composta por depósitos piroclásticos de composição traquítica/fonolítica, os quais são cortados por diques de composições variadas (lamprofíricos, tefríticos, basaníticos, traquíticos e traquiandesíticos), além de plugs fonolíticos (Almeida, 1955; Ulbrich, 1993). Representa a unidade mais antiga do arquipélago, com idades de 12.5-9.4 Ma, obtidas por Perlingeiro *et al.* (2013) pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

A Formação Quixabá é composta por derrames de composição basáltico-nefelínica, com depósitos piroclásticos de mesma composição associados, ambos cortados por diques de mesma composição. As idades para esta Formação variam de 6,2 a 1,3 Ma (Almeida, 1955; Ulbrich, 1993; Perlingeiro *et al.*, 2013).

A Formação São José é composta por lavas basaníticas expostas exclusivamente na Ilha de São José, a NE da ilha de Fernando de Noronha. Esta unidade, separada da Formação Quixabá por Almeida (1955) por conter maior número de xenólitos, detém idades de 9,2-9,0 Ma, sendo, portanto, isócrona à Formação Remédios, segundo Perlingeiro *et al.* (2013).

A ampla distribuição geoquímica das amostras pertencentes ao arquipélago de Fernando de Noronha levou Lopes *et al.* (2014) e Lopes & Ulbrich (2015) a reconhecer duas suítes de rochas, relacionadas a fontes magmáticas discretamente relacionadas, que compreendem os termos mais alcalinos (basanita-tefrito-fonotefrito-fonolito) e a série moderadamente potássica, que compreende os termos menos alcalinos (basaltos alcalinos, traquiandesito basáltico-traquiandesito-traquito).

Linha Camarões

A Linha Camarões é uma grande estrutura geológica que se estende por aproximadamente 1600 km na direção NE-SW, abrangendo desde as regiões de crosta continental, onde é formada pelo alinhamento de grandes maciços, alguns ativos, como o Monte Camarões, até as regiões de crosta oceânica, onde se encontram as ilhas Annobon (Pagalú), Príncipe, São Tomé e Bioko (Suh *et al.*, 2003; Déruelle *et al.*, 1991) (Figura 1.1H).

A ilha Bioko, é composta por rochas ultramáficas e máficas, variando entre picrobasaltos, basanitos, hawaiitos (traquibasaltos) e mugearitos (traquiandesito basáltico). Possui as idades mais jovens dentre as quatro ilhas, de <1,33 Ma pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ (Hedberg, 1969; Aka *et al.*, 2004; Chauvel *et al.*, 2005).

A ilha de Annobon ou Pagalú tem formação semelhante à Bioko, com rochas majoritariamente máficas (basanitos, traquibasaltos e traquiandesitos), contudo possui também pequenas manifestações de composição traquítica, com afinidade peralcalina. Possui idade de 20 Ma pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ (Déruelle *et al.*, 2007).

A ilha de São Tomé possui maior variedade de rochas, que são classificadas como picrobasaltos, basanitos, tefritos, tefrifonolitos e fonolitos., sendo as rochas de composição máfica mais abundantes. A idade atribuída a São Tomé é de 16 Ma pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ (Déruelle *et al.*, 2007).

A ilha Príncipe, a mais antiga, com idades de 31 Ma pelo método $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ (Déruelle *et al.*, 2007), possui variedade de rochas semelhantes às da Ilha de São Tomé. A proporção também é semelhante, com maior abundância de rochas máficas em comparação com as rochas félsicas, mais evoluídas. Não obstante, na Ilha Príncipe há maior ocorrência de rochas félsicas, como fonolitos.

Comparando-se as idades determinadas para cada ilha e sua posição geográfica, a Linha Camarões não apresenta evolução cronológica típica encontrada

em cadeias oceânicas. Isto também é observado nas porções continentais da Linha (Lee *et al.*, 1994; Marzoli *et al.*, 2000).

2.1.3 Métodos de trabalho

Simulação de dispersão de púmices por correntes marítimas

Para o estudo do comportamento de púmices lançados à deriva, foi utilizado o *site plasticadrift.org*, desenvolvido por van Sebille *et al.* (2012). A partir desse site, a inserção das coordenadas do ponto de origem dos materiais flutuantes (púmices, no caso desse estudo) gera modelagem na qual se mostra o espalhamento geográfico dos fragmentos carregados pelas correntes marítimas através do tempo. A modelagem permite observar a evolução da dispersão dos fragmentos pelos oceanos em período de dez anos, em intervalos de 2 meses.

Estudos anteriores, como de Risso *et al.* (2002), demonstram que mesmo púmices com 11 cm de diâmetro ficariam em torno de 2,33 anos flutuando. Dessa forma, considerando que o tempo de flutuabilidade dos púmices é proporcional ao diâmetro e que nenhum fragmento estudado possui a dimensão de 11 cm (medindo no máximo 7 cm), considerar os dez anos simulados pelo site seria superestimar o tempo de flutuabilidade e a capacidade de dispersão dos púmices. Assim, estipulou-se o período de 4,66 anos para limitar as modelagens, sendo esse período duas vezes maior que o determinado por Risso *et al.* (2002), dando ampla margem de tempo a ser considerada nos estudos de dispersão.

Análises litogeoquímicas das ilhas oceânicas

Os dados litogeoquímicos foram obtidos a partir de estudos prévios de diversos autores referente às ilhas oceânicas do Atlântico Sul. Grande parte desses dados foi compilada do *site* GEOROC *database* (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>), sendo que estes passaram por refinamento, retirando amostras cujo somatório total de elementos maiores fosse maior do que 102% e menor do que 96%.

Amostras de púmices

Foram estudadas quatro amostras pertencentes ao acervo do Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Paraná (LECOST-UFPR), sendo uma

proveniente do Balneário Barrancos, no Município de Pontal do Paraná (PR), uma da Praia de Itacimirim, Município de Camaçari (BA) e duas da Praia dos Andradas, na Ilha da Trindade.

Análise petrográfica

Descrições petrográficas dos púmices foram feitas a partir de lâminas delgadas confeccionadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR-UFPR) e descritas em microscópios petrográficos de luz transmitida do Laboratório de Pesquisa em Microscopia do Departamento de Geologia da UFPR (LAPEM-UFPR).

Análises geoquímicas de rocha total

Para a obtenção dos dados geoquímicos, as amostras de púmices foram analisadas por meio das técnicas analíticas de fluorescência de raios X (FRX), segundo Norrish & Hutton (1969), para determinação de óxidos maiores, e espectrometria de massa por plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), para determinação de elementos traço (como elementos LILE e HFSE) e ETRs.

Inicialmente, as amostras de púmices foram polidas utilizando uma microrretífica *Dremel* para retirar contaminações, principalmente de quartzo, presente nas vesículas mais superficiais dos fragmentos, previamente identificadas por meio das análises petrográficas.

As amostras foram preparadas no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas da UFPR (LAMIR-UFPR) e enviadas para análise ao laboratório *Activation Laboratories Ltd.* (Actlabs), localizado na cidade de Toronto, no Canadá.

Segundo as informações do laboratório (disponíveis em www.actlabs.com/geochemistry), as análises por ICP-MS foram feitas a partir da mistura das amostras com metaborato de lítio e tetraborato de lítio, posterior fusão em forno de indução e ataque por ácido nítrico 5%. As análises por fluorescência de raios X são realizadas por meio da mistura de 0.75g de amostra com 9.75g de mistura de tetraborato de lítio, metaborato de lítio e bromido de lítio, posterior fusão em recipientes de Pt.

Os resultados foram tratados utilizando o *software* GCDKit, desenvolvido por Janoušek *et al.* (2006).

Para a classificação das amostras utilizando o diagrama Total Alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs. Silica (TAS) de Le Bas *et al.* (1986), houve a necessidade de

recalcular os valores de óxidos, retirando as porcentagens de perda ao fogo (LOI). O recálculo das porcentagens-peso foi realizado pela fórmula:

$$\%recalculada = \left[\frac{\%inicial \times \sum Total}{(\sum Total - LOI)} \right] \quad (1)$$

Onde *%recalculada* é o novo valor da porcentagem-peso do óxido, *%inicial* é o valor original, $\sum total$ corresponde ao somatório total inicial dos óxidos, e *LOI* corresponde à porcentagem de perda ao fogo.

A comparação da composição dos púmices do litoral do Brasil com a composição das ilhas do Atlântico Sul foi feita utilizando diagramas de variação e discriminantes binários relacionando elementos traço.

Tratamento estatístico

Como comentado por Rollinson (1993), a estatística pode ser uma forte aliada nas interpretações geoquímicas. Assim, cálculos estatísticos foram utilizados para auxiliar na definição da fonte geradora dos púmices estudados.

Escolheu-se o cálculo do Coeficiente de Correlação de Spearman (*R_s*) para esse fim (1), já que nos estudos geoquímicos as distribuições das amostras frequentemente não são normais e *outliers* são comuns (Rollinson, 1993). Utilizou-se a fórmula:

$$R_s = 1 - \left[\frac{6\sum D^2}{n(n^2-1)} \right] \quad (2)$$

Em que *D* é a diferença entre a posição no *rank* de cada amostra e *n* é o número de amostras. Para calcular os valores dos coeficientes utilizou-se o software BioEstat 5.3, desenvolvido por Ayres *et al.* (2007).

Foram utilizados para esse cálculo os teores de sete elementos traço incompatíveis, com caráter petrogenético, sendo eles Zr, Nb, Y, Rb, Sr, La e Ce.

Para cada ilha oceânica foram calculados dois *R_s* entre cada par de elementos: um considerando apenas os teores específicos da ilha e outro incluindo as amostras de púmices no conjunto amostral. Dessa forma, foram geradas duas matrizes de correlação para cada ilha, com e sem os púmices nos cálculos.

A partir da diferença entre os dois *R_s* (ΔR_s) de cada ilha, foi possível calcular a média aritmética simples (2) dessas variações, em que x_1, x_2, x_n são os valores dos dados e *n* é o número de dados, e o desvio padrão populacional (3), em que x_i é o valor do dado *i* no conjunto de dados, \bar{x} é o valor da média e *n* é o número de dados.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

Assim, a ilha que foi considerada a mais correlacionada com os púmices foi a que obteve as médias de ΔR_s mais próximas a zero, ou seja, que mesmo com a inserção dos púmices no conjunto amostral ocorreu pouca mudança nos valores dos coeficientes, e que, além disso, obteve baixo desvio padrão, indicando que os valores absolutos de ΔR_s estão pouco dispersos em relação à média

No cálculo dos coeficientes, mesmo valores abaixo do valor crítico para 95% de confiança (calculados por Sachs, 1984) e, portanto, não significativos, não foram excluídos da pesquisa, pois o objetivo é determinar qual o valor dos R_s para cada ilha e o quanto variam estes valores caso os púmices sejam incluídos.

2.1.4 Resultados

Simulação de dispersão por correntes oceânicas superficiais

As simulações permitiram analisar as ilhas que poderiam gerar fragmentos que, transportados por correntes, chegariam à costa brasileira e aos locais onde foram coletados os púmices.

De acordo com as simulações, a ilha Bouvet (coordenadas: 54°26'S; 3°24'E) é a única ilha oceânica cujos materiais não alcançariam a costa do Brasil, já que a deriva marítima predominante nos entornos da ilha é para leste, seguindo o fluxo da Corrente Circumpolar Antártica (Figura 1.2). No período estipulado (4,66 anos), eventuais púmices atingiriam o litoral sul da Austrália, o litoral da Nova Zelândia, cruzariam o extremo sul do Oceano Pacífico e alcançariam a costa oeste da América do Sul. Apenas uma pequena parte desse material conseguiria adentrar novamente o Atlântico Sul, porém ficaria confinada à porção mais ao sul desse oceano, não adentrando o GSAS e não se aproximando da costa do Brasil. Com isso, a ilha Bouvet foi excluída das análises posteriores, já que não seria possível aos púmices gerados nessa ilha chegar à costa brasileira antes de afundar.

A ilha Gough (coordenada: 40°19'S; 9°55'W) e o Grupo Tristão da Cunha (coordenada: 37°4'S; 12°19'W) têm resultados semelhantes. Como ambos estão localizados na região limítrofe entre o GSAS e a Corrente Circumpolar Antártica, a

deriva oceânica, a partir dessas ilhas, é influenciada pelos dois sistemas oceânicos (Figura 1.2). Assim, uma fração dos materiais seria carregada ao sul da África e adentraria o Oceano Índico, ficando confinada nesse oceano. Porém, a maior parte dos fragmentos ficaria subordinada ao GSAS, completando o giro antes dos 4,66 anos. Em menos de 2,83 anos esses fragmentos percorreriam toda a costa leste do Brasil, chegando à IT, CA e PP.

A Ilha da Trindade (coordenada: 20°31'S; 29°19'W) é a única ilha cuja dispersão de materiais fica confinada ao GSAS (Figura 1.2), alcançando toda a costa leste do Brasil em 0,66 ano.

As ilhas de Santa Helena (coordenada: 15°56'S; 5°43'W) e Ascensão (coordenada: 7°56'S; 14°25'W) também apresentam resultados semelhantes. Ambas estão inseridas no contexto da Corrente Sul Equatorial, limite norte do GSAS, com deriva para oeste (Figura 1.2). Desse modo, os fragmentos seriam inicialmente carregados em direção ao litoral do Nordeste brasileiro, na latitude de 10°S, bifurcando-se ao se aproximar do litoral brasileiro. Uma fração dos fragmentos adentraria a Corrente Norte do Brasil e seria transportada para noroeste, alcançando as ilhas do Caribe e a costa sudeste dos EUA. Porém, a maior parte dos púmices seria transportada para sul e ficaria confinada ao GSAS, margeando toda a costa leste do Brasil em menos de 1,5 ano.

O Arquipélago de Fernando de Noronha (coordenada: 3°51'S; 32°25'W) está inserido no contexto da Corrente Norte do Brasil (Figura 1.2) e, portanto, a dispersão de púmices a partir deste local seguiria na direção noroeste, margeando a costa norte do Brasil, alcançando as ilhas do Caribe e adentrando o Giro Subtropical do Atlântico Norte. Apesar da área de dispersão rumar na direção do Atlântico Norte, se afastando dos pontos de interesse, decidiu-se não excluir Fernando de Noronha dos estudos litogeoquímicos, já que está localizada próximo ao litoral do Brasil.

As ilhas da Linha Camarões apresentam o comportamento mais complexo. Para a simulação escolheu-se as coordenadas da ilha de São Tomé (0°14'N; 6°36'E), já que, devido à proximidade das quatro ilhas, o comportamento da distribuição pelas correntes seria o mesmo. As ilhas da Linha Camarões estão inseridas no contexto da Corrente da Angola, que flui em sentido circular anti-horário no Golfo da Guiné (Figura 1.2). Por esse motivo, uma fração dos fragmentos ficaria aprisionada no próprio Golfo. Porém, a maior parte seria transportada pela Corrente Sul Equatorial, bifurcando-se na costa leste do Brasil, onde grande parte rumaria em direção ao Atlântico Norte,

enquanto outra porção migraria em direção ao sul, margeando toda a costa leste do Brasil dentro de 2,83 anos.

Análise petrográfica

Em lâmina delgada, os púmices de PP, CA e IT possuem semelhanças minerais. São formados por 15-20% de cristaloclastos em meio à matriz vítrea vesiculada. Esta porcentagem é composta basicamente pela sanidina, que compõe entre 10 e 15% das amostras e ocorre em cristais euédricos prismáticos de granulação média < 3 mm (Figura 1.3A; C; E)

A egirina-augita ocorre como cristaloclasto nos púmices de PP e IT em porcentagens de no máximo 1%. Os cristais são definidos por pleocroísmo que varia de verde-oliva a castanho amarelado. São cristais euédricos a subédricos prismáticos, de granulação fina, não ultrapassando 1 mm (Figura 1.3B; D).

A kaersutita ocorre nos púmices de CA e IT em porcentagens <1%, tendo sido definida pelo seu forte pleocroísmo, variando de castanho claro a castanho avermelhado, e, sob nicóis cruzados, pela extinção oblíqua de baixo ângulo, diferenciando-se da biotita. São cristais euédricos prismáticos, de granulação muito fina, com cristais menores do que 0.1 mm (Figura 1.3G; F)

A matriz vítrea varia de incolor a fortemente turva, intensamente argilizada, com textura fibrosa e estrutura de fluxo, marcada pela orientação das vesículas e cristaloclastos.

Na Figura 1.3A, é possível identificar cristais de quartzo acumulados no interior de uma vesícula. São cristais límpidos, de granulação fina (<1mm), subarredondados. Estes cristais ocorrem apenas no interior de vesículas e são sedimentos provenientes da praia de onde as amostras foram coletadas.

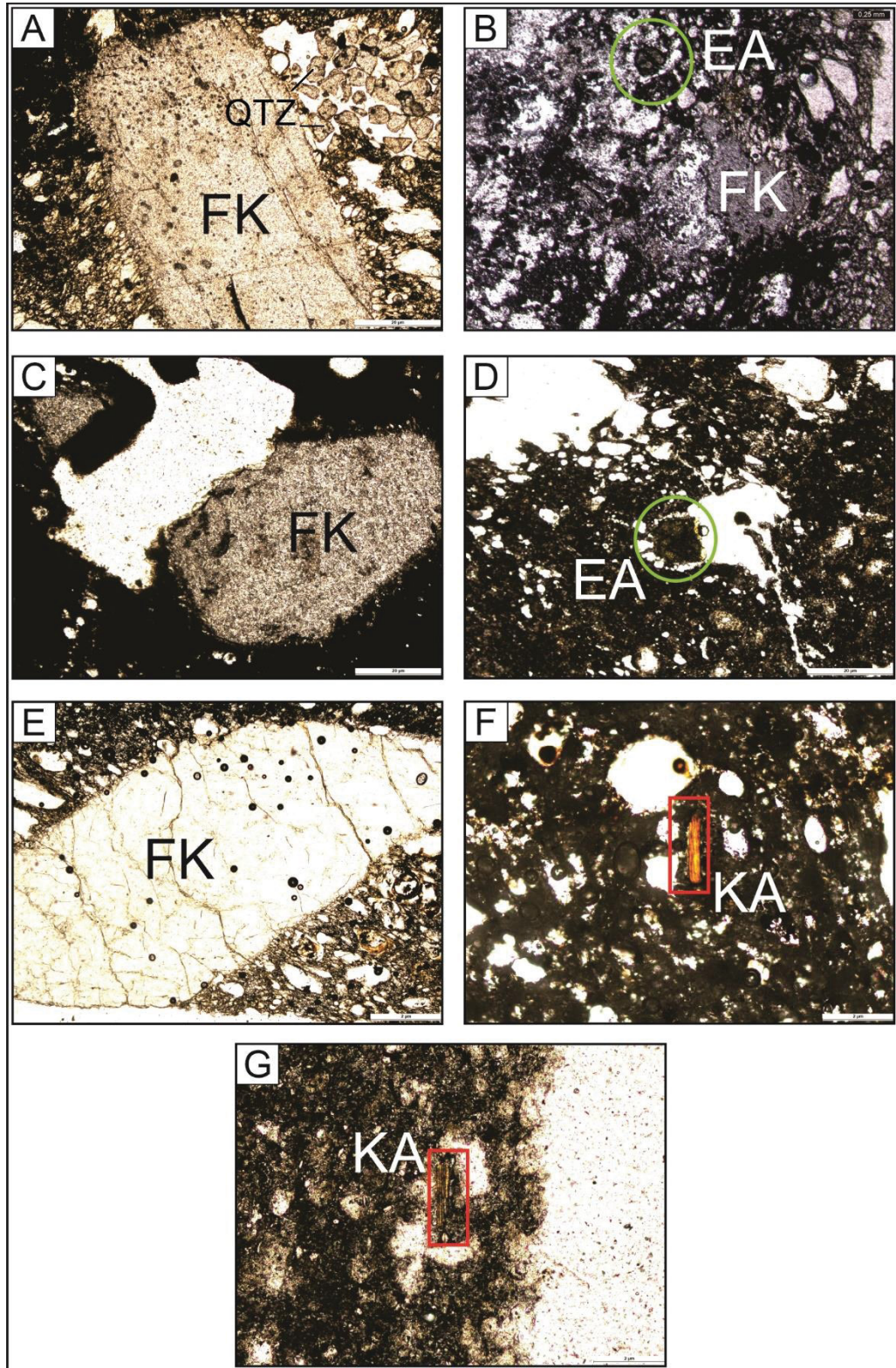


Figura 1.3 – Fotomicrografia das lâminas dos púmpices de Pontal do Paraná (A e B), Ilha da Trindade (C, D e G) e Camaçari (E e F). Símbolos: Feldspato Alcalino (FK); Egirina-augita (EA e círculos verdes); Kaersutita (KA e retângulos vermelhos); Quartzo (QTZ). Nicóis paralelos.

Litogeoquímica

Púmices

Na Tabela 1.1 são apresentados os resultados analíticos das amostras de PP, CA e IT. Abaixo, na mesma Tabela 1.1, são apresentados os valores recalculados das porcentagens de óxidos a partir da retirada dos valores de LOI.

Tabela 1.1– Resultados analíticos dos púmices de Camaçari, Ilha da Trindade e Pontal do Paraná. Abaixo as porcentagens de óxidos recalculadas a partir da retirada dos valores de LOI.

Amostra	Camaçari	Ilha da Trindade	Ilha da Trindade	Pontal do Paraná
SiO ₂	62,19	61,38	61,52	62,19
TiO ₂	0,27	0,25	0,28	0,29
Al ₂ O ₃	17,82	17,53	17,57	17,74
Fe ₂ O _{3t}	1,94	2,05	2	1,96
MnO	0,17	0,21	0,18	0,18
MgO	0,28	0,40	0,43	0,13
CaO	0,92	0,77	0,87	0,78
Na ₂ O	7,42	7,75	7,45	7,33
K ₂ O	5,58	5,32	5,49	5,48
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,04	0,03
LOI	3,96	4,29	4,66	3,78
Total	100,60	99,99	100,50	99,90
Sc	< 1	< 1	< 1	< 1
V	10	9	11	9
Cr	< 20	< 20	< 20	< 20
Co	158	90	110	101
Ni	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn	100	130	110	110
Ga	29	33	30	31
Cs	3	4	3,2	3,3
Rb	234	285	246	249
Ba	12	9	9	10
Sr	14	12	13	7
Pb	16	21	18	18
Th	39,4	50,4	44,3	43,2
U	9,0	11,8	9,8	9,9
Nb	193	227	206	197
Ta	9,6	8,5	9,0	8,6
La	173	185	203	178
Ce	228	229	256	230
Pr	15,7	14,3	16,4	15,4

Nd	37,2	31,4	36,4	35,7
Zr	748	852	715	817
Hf	16,9	19,6	17,1	17,8
Sm	3,7	3	3,4	3,6
Eu	0,5	0,3	0,4	0,5
Gd	2,4	1,9	2,2	2,4
Tb	0,4	0,3	0,4	0,4
Dy	2,6	2,2	2,4	2,6
Ho	0,6	0,5	0,5	0,6
Er	2,1	1,9	1,9	2,0
Tm	0,3	0,3	0,3	0,3
Yb	2,7	2,7	2,6	2,6
Lu	0,4	0,5	0,4	0,4
Y	19,1	18,7	18,9	19,1

Amostra	Camaçari	Ilha da Trindade	Ilha da Trindade	Pontal do Paraná
SiO ₂	64,74	64,11	64,49	64,64
TiO ₂	0,28	0,26	0,29	0,30
Al ₂ O ₃	18,55	18,31	18,42	18,44
FeO _t	2,02	2,14	2,10	2,04
MnO	0,18	0,22	0,19	0,19
MgO	0,29	0,42	0,45	0,14
CaO	0,96	0,80	0,91	0,81
Na ₂ O	7,72	8,09	7,81	7,62
K ₂ O	5,81	5,56	5,75	5,70
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,04	0,03
LOI				
Total	100,6	100,0	100,5	99,9

As quatro amostras de púmices analisadas são classificadas como traquitos. (Figura 1.4). A linha que separa as composições alcalinas das subalcalinas/toleíticas, definida por Irvine & Baragar (1971), evidencia a afinidade alcalina desses fragmentos, cujos valores de Na₂O+K₂O são de 13,53% (CA), 13,65% (IT), 13,56% (IT) e 13,31% (PP) em relação à sílica (64,74; 64,11; 64,49; 64,64%, respectivamente).

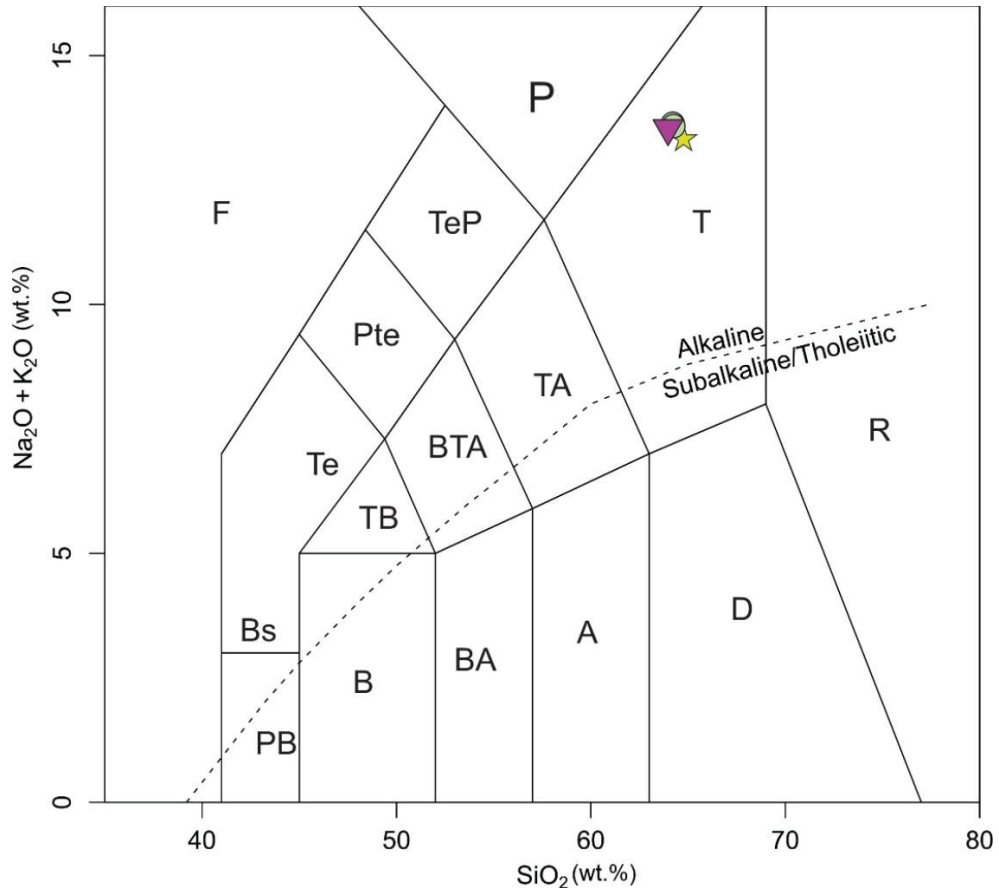


Figure 1.4 – Classificação das amostras de púmpices, a partir do diagrama Total Alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vs. Silica de Le Bas *et al.* (1986), utilizando os valores recalculados de óxidos, e linha de separação da série alcalina/subalcalina de Irvine & Baragar (1971). Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo) e Ilha da Trindade (dois círculos). Siglas: PB: picrobasalto; B: basalto; BA: andesito basáltico; A: andesito; D: dacito; R: riolito; F: foidito; BS: basanita; TB: traquibasalto; BTA: traquiandesito basáltico; TA: traquiandesito; T: traquito; Te: tefrito; PTe: fonotefrito; TeP: tefrifonolito; P: fonolito

No diagrama multielementar de ETRs normalizado pelo Condrito de Nakamura (1974) (Figura 1.5A), as assinaturas geoquímicas dos púmpices possuem padrões muito semelhantes, caracterizadas pelo forte enriquecimento em ETRL, anomalias negativas em Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,57$ (CA); 0,50 e 0,53 (IT); 0,56 (PP)), e empobrecimento em ETRP, com fraca tendência de enriquecimento dos ETRP em relação ao Eu. O mesmo se observa utilizando diagrama multielementar para elementos traço normalizado pelo Manto Primordial de McDonough & Sun (1995) (Figura 1.5B). As assinaturas dos fragmentos praticamente se sobrepõem, mantendo os mesmos padrões. Nota-se que em relação ao Manto Primordial, há enriquecimento em LILE, com exceção do Ba, com anomalias negativas. Por outro lado, há empobrecimento em HFSE, com concentrações menores do que 10 vezes em relação ao Manto Primordial, à exceção do Zr e do Nd, com anomalias positivas.

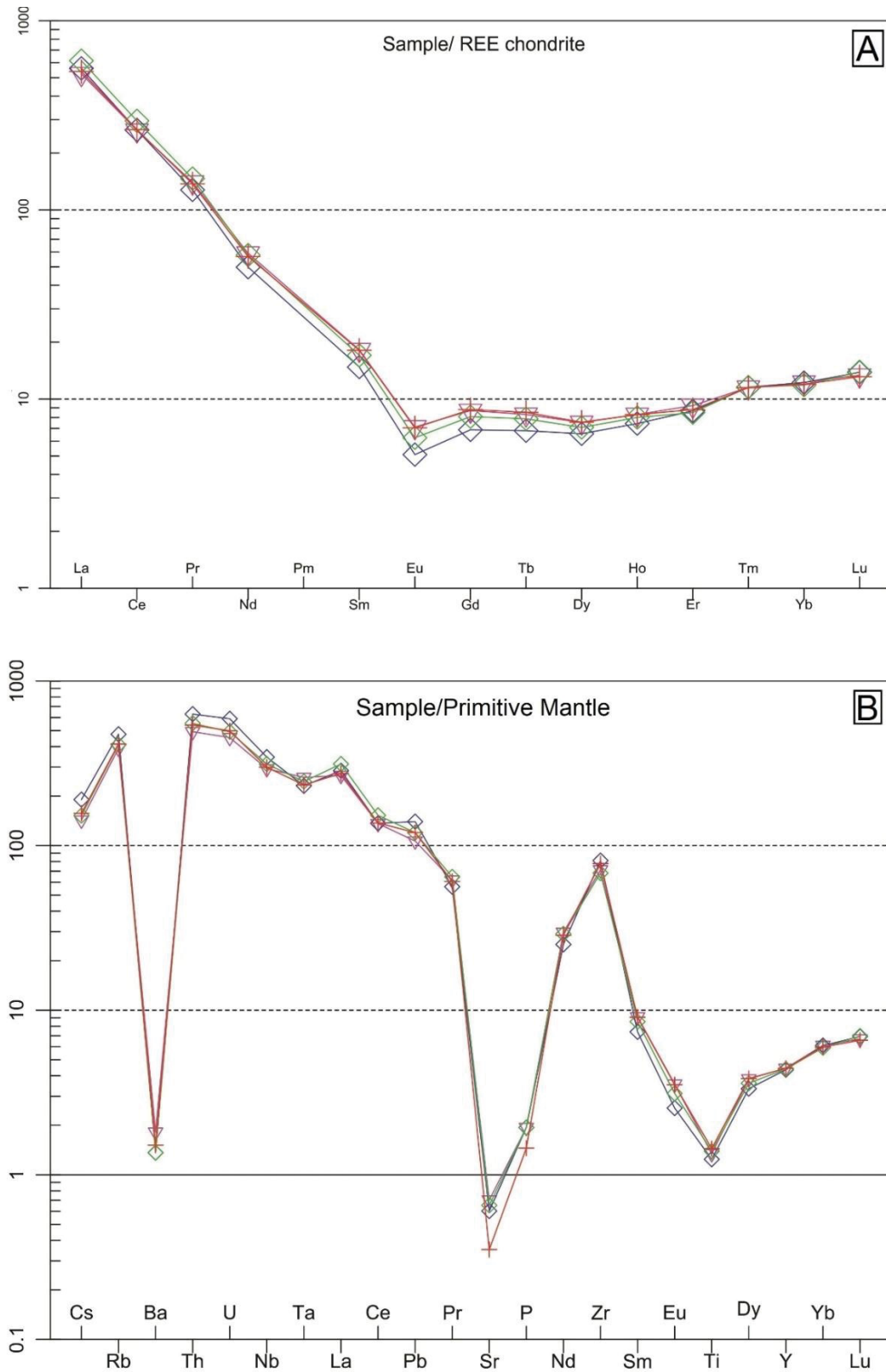


Figura 1.5 – Diagrama multielementar para (A) elementos terras raras ETR normalizado pelo condrito de Nakamura (1974) e (B) para elementos traço normalizados pelo Manto Primordial de McDonough & Sun (1995). Púmices de Ponta do Paraná (Cruz vermelha); Camaçari (Triângulo roxo); e Ilha da Trindade (Losangos verde e azul)

Púmices e comparação com ilhas oceânicas

Projetando os teores de elementos incompatíveis em relação a razões desses mesmos elementos com elementos menos incompatíveis, é possível obter tendências de cristalização e evolução magmática, identificando processos de fracionamento geoquímico (Rollinson, 1993; Pearce & Norry, 1979; Wilson, 2007).

Como a composição das ilhas oceânicas são semelhantes, quando plotadas nos diagramas houve forte sobreposição entre os campos geoquímicos, exigindo a separação dos campos em dois diagramas, para facilitar a visualização e interpretação.

Nos diagramas discriminantes utilizando La vs La/Y e Nb vs. Nb/Y, os púmices possuem altas concentrações de La e Nb e valores elevados das razões La/Y e Nb/Y (Figura 1.6). Estão alinhados e agrupados em um mesmo campo dos diagramas, porém fora dos grupos de concentração de todas as ilhas. Contudo, dentre as ilhas analisadas, a composição dos púmices se aproxima do campo geoquímico de Tristão da Cunha, alinhando-se com a sequência evolutiva desse Grupo de ilhas. Fernando de Noronha e a Linha Camarões também possuem composições semelhantes, porém menos do que Tristão da Cunha. A ilha da Trindade e Gough possuem pouca semelhança, enquanto Santa Helena e, principalmente, Ascensão se afastam consideravelmente da composição dos púmices.

No diagrama que relaciona Zr vs. Zr/Y, as amostras de púmices novamente se alinham e se localizam em uma mesma região do diagrama (Figura 1.6). Neste diagrama, alguns púmices são englobados pelos campos geoquímicos das ilhas Fernando de Noronha (que contém as amostras de CA, PP e uma da IT), Linha Camarões (que engloba as amostras de CA e uma da IT), e Tristão da Cunha (que engloba uma amostra da IT). Os campos de composição da Ilha da Trindade e Gough estão próximos dos púmices, porém não englobam amostras. Santa Helena e, principalmente, Ascensão possuem os campos geoquímicos que mais se afastam da composição dos púmices.

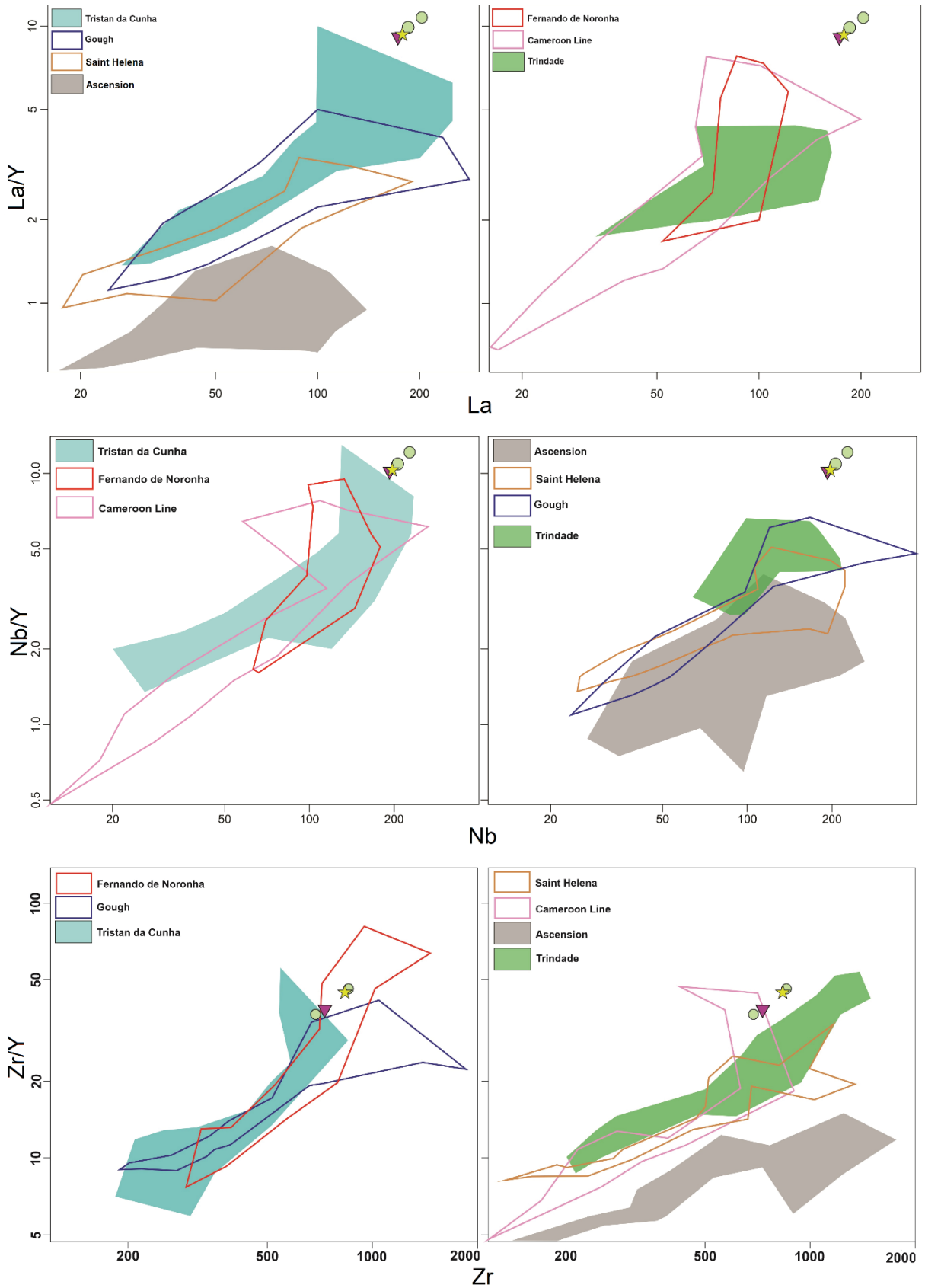


Figura 1.6 – Diagramas discriminantes com os campos geoquímicos das ilhas oceânicas e a composição dos púmices estudados. Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo) e Ilha da Trindade (dois círculos). Referências: **Ascensão**: Harris (1983), Weaver *et al.* (1987), Halliday *et al.* (1995), Weaver *et al.* (1996), Kar *et al.* (1998), Jicha *et al.* (2013), Chamberlain *et al.* (2016); **Fernando**

de Noronha: Weaver *et al.* (1990), Halliday *et al.* (1995), Lopes & Ulbrich (2015), Lopes (2002); **Gough:** Le Roex (1985), Weaver *et al.* (1987); **Linha Camarões:** Fitton & Hughes (1977), Llotard *et al.* (1982), Fitton (1987), Halliday *et al.* (1995), Yamgouot *et al.* (2016); **Santa Helena:** Baker (1969), Weaver *et al.* (1987), Chaffey *et al.* (1989), Kawabata *et al.* (2011); **Trindade:** Weaver *et al.* (1990), Marques *et al.* (1999), Bongiolo *et al.* (2015); **Tristão da Cunha:** Weaver *et al.* (1987), Le Roex *et al.* (1990), Cliff *et al.* (1991), Baker *et al.* (1964)

Utilizando os mesmos elementos da Figura 1.6 na forma de diagramas de variação normalizados pela razão com Y, os diagramas da Figura 1.7 (Zr/Y vs. La/Y e Zr/Y vs. Nb/Y) possuem características semelhantes. Em ambos as amostras se concentram em um mesmo campo dos diagramas, sendo que as amostras de CA e PP estão inseridas no campo geoquímico de Tristão da Cunha e as amostras da IT estão próximas a esse campo. Fernando de Noronha e Linha Camarões definem campos que se aproximam dos púmices estudados, embora menos que Tristão da Cunha. Ilha da Trindade e Gough estão fracamente relacionados, enquanto Santa Helena e, principalmente, Ascensão se afastam da composição dos púmices.

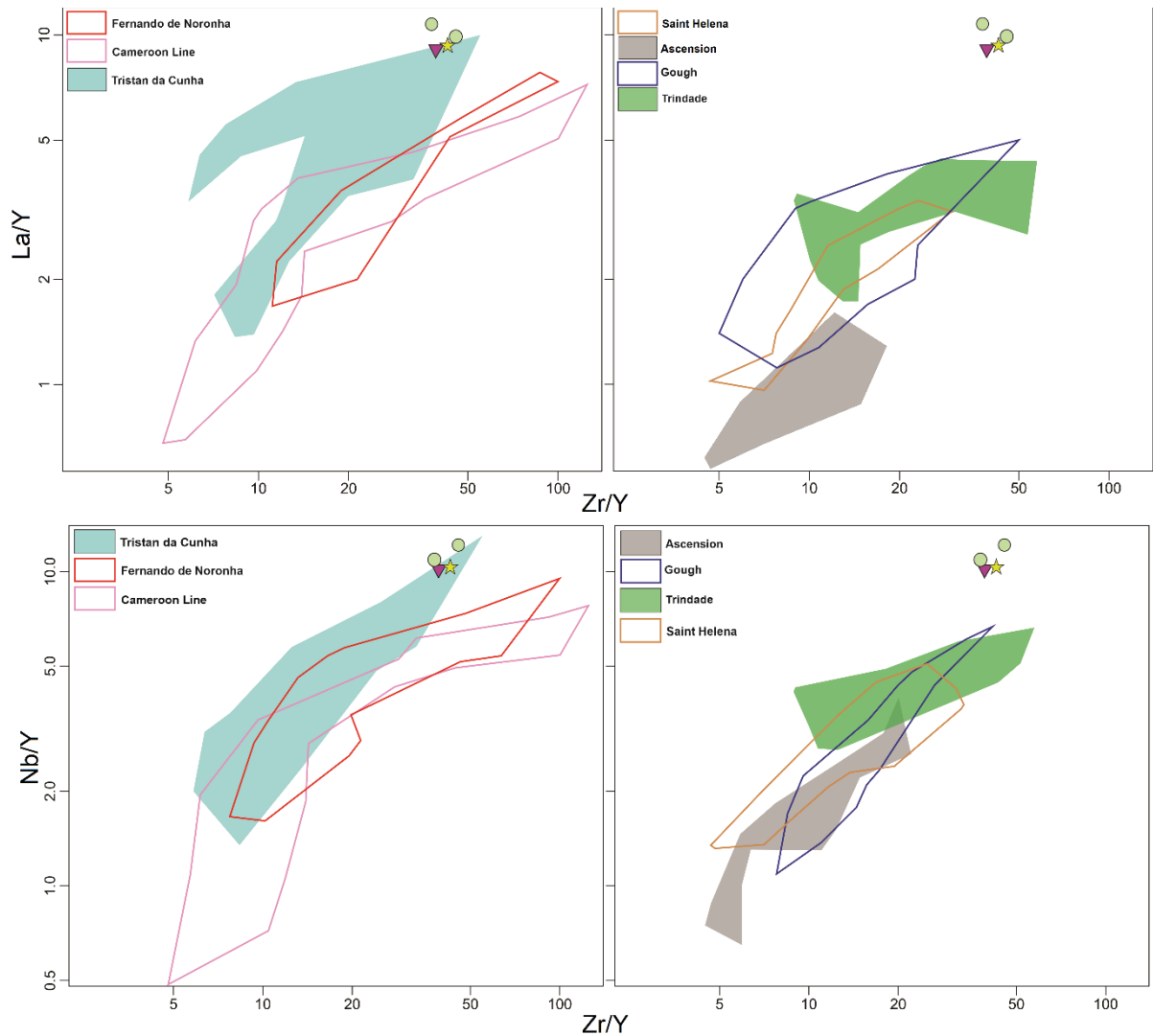


Figura 1.7 – Diagramas de variação com a distribuição dos campos geoquímicos das ilhas oceânicas e a composição dos púmices. Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo) e Ilha da Trindade (dois círculos). Referências da Figura 1.6

Tratamento estatístico

Os resultados obtidos a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Spearman (R_s) para cada ilha são apresentados na Tabela 1.2. As matrizes da coluna esquerda apresentam os coeficientes de correlação R_s considerando as quatro amostras de púmices dentro do conjunto amostral de cada ilha. A coluna da direita mostra os resultados sem os púmices, considerando apenas os teores de cada ilha. O número de amostras e o valor do R_s crítico para 95% de confiança (Sachs, 1984) são indicados abaixo de cada tabela, sendo que os valores de R_s que estejam abaixo do R_s crítico estão sinalizados pela cor bege.

Tabela 1.2 - Resultados dos Coeficientes de Correlação de Spearman (Rs) para cada ilha, com e sem os púmices no conjunto amostral

Ascensão

Com Pumices								Sem Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce		Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1							Zr	1						
Nb	0,9489	1						Nb	0,9813	1					
Y	0,6126	0,4345	1					Y	0,8777	0,8607	1				
Rb	0,8758	0,9323	0,2876	1				Rb	0,9410	0,9361	0,8742	1			
Sr	-0,7948	-0,7892	-0,4311	-0,8193	1			Sr	-0,7343	-0,7117	-0,7647	-0,8004	1		
La	0,8819	0,9421	0,2968	0,9406	-0,7069	1		La	0,9575	0,9544	0,8877	0,9148	-0,6476	1	
Ce	0,8864	0,9508	0,3134	0,9325	-0,7046	0,9911	1	Ce	0,9539	0,958	0,8718	0,9071	-0,6334	0,9902	1
N=34 R=0,414								N=30 R=0,439							

Fernando de Noronha

Com Pumices								Sem Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce		Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1							Zr	1						
Nb	0,3227	1						Nb	0,2418	1					
Y	-0,5305	-0,0373	1					Y	-0,4698	0,1482	1				
Rb	0,8885	0,4059	-0,7051	1				Rb	0,8985	0,2341	-0,6451	1			
Sr	-0,4666	-0,1804	0,3791	-0,5379	1			Sr	-0,3419	0,1415	0,2684	-0,3545	1		
La	0,6549	0,6886	-0,1927	0,648	-0,3069	1		La	0,6522	0,5569	-0,0508	0,5589	-0,029	1	
Ce	0,1024	0,6110	0,3945	0,0909	-0,0341	0,7321	1	Ce	-0,0271	0,4566	0,6541	-0,1499	0,2944	0,6225	1
N=36 R=0,402								N=32 R=0,426							

Gough

Com Pumices								Sem Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce		Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1							Zr	1						
Nb	0,8624	1						Nb	0,8373	1					
Y	0,4513	0,4728	1					Y	0,7033	0,7419	1				
Rb	0,8276	0,8191	0,2495	1				Rb	0,7959	0,7848	0,4789	1			
Sr	0,0228	-0,0429	0,2760	-0,0418	1			Sr	0,2151	0,1386	0,1385	0,1400	1		
La	0,5929	0,7297	0,3709	0,6116	-0,0639	1		La	0,5247	0,6784	0,6205	0,5379	0,1135	1	
Ce	0,9168	0,8744	0,5072	0,8226	0,0991	0,7178	1	Ce	0,9094	0,8506	0,7828	0,7891	0,3075	0,6642	1
N=71 R=0,288								N=67 R=0,297							

Linha Camarões

Com Pumices								Sem Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce		Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce

Zr	1							
Nb	0,6731	1						
Y	-0,1052	0,0036	1					
Rb	0,8869	0,6852	-0,1844	1				
Sr	-0,1110	0,0325	0,4477	-0,1248	1			
La	0,8107	0,7957	0,1002	0,7933	0,0605	1		
Ce	0,6247	0,6094	0,4504	0,5183	0,2251	0,8316	1	

N=58 R=0,320

Zr	1							
Nb	0,6098	1						
Y	0,0780	0,1954	1					
Rb	0,8634	0,6194	-0,0002	1				
Sr	0,0869	0,2742	0,3540	0,0826	1			
La	0,7824	0,747	0,3235	0,7527	0,3089	1		
Ce	0,5837	0,5167	0,7072	0,435	0,5007	0,7919	1	

N=54 R=0,330

Santa Helena

Com pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1						
Nb	0,9647	1					
Y	0,7103	0,6808	1				
Rb	0,9570	0,9535	0,6154	1			
Sr	0,2284	0,2317	0,4849	0,2309	1		
La	0,9761	0,9807	0,6786	0,9602	0,2324	1	
Ce	0,9765	0,9805	0,703	0,9532	0,2371	0,9959	1

N=81 R=0,270

Sem pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1						
Nb	0,9630	1					
Y	0,8947	0,8967	1				
Rb	0,9551	0,9475	0,8354	1			
Sr	0,4228	0,4326	0,4080	0,4329	1		
La	0,9761	0,9791	0,9026	0,9541	0,4344	1	
Ce	0,9750	0,9750	0,9108	0,9478	0,4382	0,9961	1

N=77 R=0,277

Trindade

Com Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1						
Nb	0,5913	1					
Y	0,3744	0,4589	1				
Rb	0,5252	0,5144	-0,0579	1			
Sr	0,4005	0,3443	0,6293	0,1361	1		
La	0,4462	0,8858	0,43	0,5509	0,3776	1	
Ce	0,2907	0,8060	0,4905	0,2712	0,2873	0,8997	1

N=50 R=0,343

Sem Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1						
Nb	0,6829	1					
Y	0,4063	0,802	1				
Rb	0,6010	0,3897	0,1856	1			
Sr	0,4326	0,7009	0,5408	0,4590	1		
La	0,5186	0,8558	0,7936	0,4235	0,7688	1	
Ce	0,3350	0,7613	0,7786	0,1125	0,5769	0,8818	1

N=46 R=0,357

Tristão da Cunha

Com Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1						
Nb	0,9623	1					
Y	0,4244	0,5073	1				
Rb	0,9144	0,9064	0,3835	1			
Sr	0,3942	0,4553	0,8027	0,367	1		
La	0,9395	0,9284	0,4346	0,8985	0,4486	1	
Ce	0,9109	0,893	0,4776	0,8477	0,513	0,9684	1

N=113 R=0,229

Sem Pumices							
	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	1						
Nb	0,9581	1					
Y	0,5819	0,6739	1				
Rb	0,9047	0,8958	0,5389	1			
Sr	0,5533	0,6214	0,7803	0,5231	1		
La	0,933	0,9203	0,5953	0,8869	0,6141	1	
Ce	0,9025	0,882	0,6333	0,8318	0,6769	0,9652	1

N=109 R=0,231

A Tabela 1.3 apresenta os valores da diferença entre os Rs (ΔR_s) de cada ilha, subtraindo os valores dos Rs “sem púmices” dos Rs “com púmices”.

Tabela 1.3 – Variação dos coeficientes de correlação (ΔR_s), calculados a partir da subtração dos coeficientes “com púmice” e “sem púmice” da Tabela 1.2 para cada ilha oceânica.

Ascensão

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	-0,0324	0					
Y	-0,2651	-0,4262	0				
Rb	-0,0652	-0,0038	-0,5866	0			
Sr	-0,0605	-0,0775	0,3336	-0,0189	0		
La	-0,0756	-0,0123	-0,5909	0,0258	-0,0593	0	
Ce	-0,0675	-0,0072	-0,5584	0,0254	-0,0712	0,0009	0

Fernando de Noronha

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	0,0809	0					
Y	-0,0607	-0,1855	0				
Rb	-0,01	0,1718	-0,06	0			
Sr	-0,1247	-0,3219	0,1107	-0,1834	0		
La	0,0027	0,1317	-0,1419	0,0891	-0,2779	0	
Ce	0,1295	0,1544	-0,2596	0,2408	-0,3285	0,1096	0

Gough

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	0,0251	0					
Y	-0,252	-0,2691	0				
Rb	0,0317	0,0343	-0,2294	0			
Sr	-0,1923	-0,1815	0,1375	-0,1818	0		
La	0,0682	0,0513	-0,2496	0,0737	-0,1774	0	
Ce	0,0074	0,0238	-0,2756	0,0335	-0,2084	0,0536	0

Linha Camarões

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	0,0633	0					
Y	-0,1832	-0,1918	0				
Rb	0,0235	0,0658	-0,1842	0			
Sr	-0,1979	-0,2417	0,0937	-0,2074	0		
La	0,0283	0,0487	-0,2233	0,0406	-0,2484	0	
Ce	0,041	0,0927	-0,2568	0,0833	-0,2756	0,0397	0

Santa Helena

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	0,0017	0					
Y	-0,1844	-0,2159	0				
Rb	0,0019	0,006	-0,22	0			
Sr	-0,1944	-0,2009	0,0769	-0,202	0		
La	0	0,0016	-0,224	0,0061	-0,202	0	
Ce	0,0015	0,0055	-0,2078	0,0054	-0,2011	-0,0002	0

Trindade

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	-0,0916	0					
Y	-0,0319	-0,3431	0				
Rb	-0,0758	0,1247	-0,2435	0			
Sr	-0,0321	-0,3566	0,0885	-0,3229	0		
La	-0,0724	0,03	-0,3636	0,1274	-0,3912	0	
Ce	-0,0443	0,0447	-0,2881	0,1587	-0,2896	0,0179	0

Tristão da Cunha

ΔR_s

	Zr	Nb	Y	Rb	Sr	La	Ce
Zr	0						
Nb	0,0042	0					
Y	-0,1575	-0,1666	0				
Rb	0,0097	0,0106	-0,1554	0			
Sr	-0,1591	-0,1661	0,0224	-0,1561	0		
La	0,0065	0,0081	-0,1607	0,0116	-0,1655	0	
Ce	0,0084	0,011	-0,1557	0,0159	-0,1639	0,0032	0

A Tabela 1.4 organiza os valores de ΔR_s da Tabela 1.3 relativos a cada elemento. Nessa tabela, as colunas de ΔR_s agrupam aos valores de cada ilha. Além disso, a Tabela 1.4 apresenta os valores da média e do desvio padrão populacional dos ΔR_s das ilhas oceânicas.

Tabela 1.4 – Valores de ΔR_s agrupados a partir de cada elemento. As colunas reúnem as medidas de ΔR_s para cada ilha oceânica com os valores respectivos da média e desvio padrão populacional dos ΔR_s . Siglas: AS-Ascensão; TC-Tristão da Cunha; TR-Trindade; FN-Fernando de Noronha; CL-Linha Camarões; GO-Gough; SH-Santa Helena.

Ce							
Zr	-0,0675	0,0084	-0,0443	0,1295	0,041	0,0074	0,0015
Nb	-0,0072	0,011	0,0447	0,1544	0,0927	0,0238	0,0055
Y	-0,5584	-0,1557	-0,2881	-0,2596	-0,2568	-0,2756	-0,2078
Rb	0,0254	0,0159	0,1587	0,2408	0,0833	0,0335	0,0054
Sr	-0,0712	-0,1639	-0,2896	-0,3285	-0,2756	-0,2084	-0,2011
La	0,0009	0,0032	0,0179	0,1096	0,0397	0,0536	-0,0002
Média	-0,113	-0,0468	-0,0668	0,0077	-0,0460	-0,0610	-0,0661
Desvio Padrão	0,2023	0,0800	0,1681	0,2182	0,1571	0,1302	0,0979
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

La							
Zr	-0,0756	0,0065	-0,0724	0,0027	0,0283	0,0682	0
Nb	-0,0123	0,0081	0,03	0,1317	0,0487	0,0513	0,0016
Y	-0,5909	-0,1607	-0,3636	-0,1419	-0,2233	-0,2496	-0,224
Rb	0,0258	0,0116	0,1274	0,0891	0,0406	0,0737	0,0061
Sr	-0,0593	-0,1655	-0,3912	-0,2779	-0,2484	-0,1774	-0,202
Ce	0,0009	0,0032	0,0179	0,1096	0,0397	0,0536	-0,0002
Média	-0,11857	-0,04947	-0,10865	-0,01445	-0,0524	-0,03003	-0,06975
Desvio Padrão	0,2140	0,080401	0,1988	0,1491	0,1301	0,1316	0,1015
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

Sr							
Zr	-0,0605	-0,1591	-0,0321	-0,1247	-0,1979	-0,1923	-0,1944
Nb	-0,0775	-0,1661	-0,3566	-0,3219	-0,2417	-0,1815	-0,2009
Y	0,3336	0,0224	0,0885	0,1107	0,0937	0,1375	0,0769
Rb	-0,0189	-0,1561	-0,3229	-0,1834	-0,2074	-0,1818	-0,202
La	-0,0593	-0,1655	-0,3912	-0,2779	-0,2484	-0,1774	-0,202
Ce	-0,0712	-0,1639	-0,2896	-0,3285	-0,2756	-0,2084	-0,2011
Média	0,0077	-0,13138	-0,21732	-0,18762	-0,17955	-0,13398	-0,15392
Desvio Padrão	0,1469	0,0689	0,1797	0,1522	0,1249	0,1218	0,1033
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

Rb							
Zr	-0,0652	0,0097	-0,0758	-0,01	0,0235	0,0317	0,0019
Nb	-0,0038	0,0106	0,1247	0,1718	0,0658	0,0343	0,006
Y	-0,5866	-0,1554	-0,2435	-0,06	-0,1842	-0,2294	-0,22
Sr	-0,0189	-0,1561	-0,3229	-0,1834	-0,2074	-0,1818	-0,202
La	0,0258	0,0116	0,1274	0,0891	0,0406	0,0737	0,0061
Ce	0,0254	0,0159	0,1587	0,2408	0,0833	0,0335	0,0054
Média	-0,10388	-0,04395	-0,03857	0,041383	-0,02973	-0,03967	-0,0671
Desvio Padrão	0,2181	0,0791	0,1903	0,1429	0,1191	0,1190	0,1019
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

Y							
Zr	-0,2651	-0,1575	-0,0319	-0,0607	-0,1832	-0,2520	-0,1844
Nb	-0,4262	-0,1666	-0,3431	-0,1855	-0,1918	-0,2691	-0,2159
Rb	-0,5866	-0,1554	-0,2435	-0,06	-0,1842	-0,2294	-0,22
Sr	0,3336	0,0224	0,0885	0,1107	0,0937	0,1375	0,0769
La	-0,5909	-0,1607	-0,3636	-0,1419	-0,2233	-0,2496	-0,224
Ce	-0,5584	-0,1557	-0,2881	-0,2596	-0,2568	-0,2756	-0,2078
Média	-0,3489	-0,1289	-0,1970	-0,0995	-0,1576	-0,1897	-0,1625
Desvio Padrão	0,3260	0,0678	0,1675	0,1170	0,1154	0,1471	0,1078
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

Nb							
Zr	-0,0324	0,0042	-0,0916	0,0809	0,0633	0,0251	0,002
Y	-0,4262	-0,1666	-0,3431	-0,1855	-0,1918	-0,2691	-0,2159
Rb	-0,0038	0,0106	0,1247	0,1718	0,0658	0,0343	0,006
Sr	-0,0775	-0,1661	-0,3566	-0,3219	-0,2417	-0,1815	-0,2009
La	-0,0123	0,0081	0,03	0,1317	0,0487	0,0513	0,0016
Ce	-0,0072	0,011	0,0447	0,1544	0,0927	0,0238	0,0055
Média	-0,0932	-0,0498	-0,0987	0,0052	-0,0272	-0,0527	-0,0670
Desvio Padrão	0,1510	0,0824	0,1886	0,1893	0,1354	0,1250	0,1001
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

Zr							
Nb	-0,0324	0,0042	-0,0916	0,0809	0,0633	0,0251	0,0017
Y	-0,2651	-0,1575	-0,0319	-0,0607	-0,1832	-0,252	-0,1844
Rb	-0,0652	0,0097	-0,0758	-0,01	0,0235	0,0317	0,0019
Sr	-0,0605	-0,1591	-0,0321	-0,1247	-0,1979	-0,1923	-0,1944
La	-0,0756	0,0065	-0,0724	0,0027	0,0283	0,0682	0
Ce	-0,0675	0,0084	-0,0443	0,1295	0,041	0,0074	0,0015
Média	-0,0944	-0,0480	-0,0580	0,0030	-0,0375	-0,0520	-0,0623
Desvio Padrão	0,0775	0,0780	0,0231	0,0843	0,1090	0,1229	0,0899
	AS	TC	TR	FN	CL	GO	SH

Na Figura 1.8 os resultados da Tabela 1.4 são apresentados em forma de gráfico, onde os valores da média de ΔR_s de cada ilha são representados por círculos coloridos e os valores de desvio padrão são representados pelas barras verticais. Quanto maior o tamanho das barras, mais afastados estão os valores absolutos de ΔR_s em relação à média.

Nesse gráfico, Ascensão é a ilha com as médias de ΔR_s mais afastadas do zero e que possui altos valores de desvio padrão. Mesmo em relação ao Sr, com a média mais próxima a zero, ainda assim possui alto desvio padrão.

As médias de ΔR_s de Tristão da Cunha estão entre as mais próximas a zero. Apenas em relação ao Rb a média é alta. Em 6 dos 7 elementos, Tristão da Cunha possui o menor desvio padrão, indicando que os valores absolutos de ΔR_s se mantêm próximos da média.

Trindade tem médias de ΔR_s intermediárias a altas e em 6 dos 7 elementos possui alto desvio padrão. Apenas em relação ao Zr possui o menor desvio padrão, mas que está acompanhado por média alta.

Para 5 dos 7 elementos, Fernando de Noronha possui a média de ΔR_s mais próxima de zero, porém os valores absolutos de ΔR_s estão afastados do valor da média, o que tornam altas as medidas dos desvios padrões.

As médias de ΔR_s para a Linha Camarões também estão entre as mais próximas de zero, sendo que a média em relação ao Rb é a menor dentre as ilhas. Os desvios padrões apresentam valores baixos a intermediários.

A Ilha Gough mantém posições intermediárias nos gráficos, tanto nos valores das médias quanto nos desvios padrões.

Para 6 dos 7 elementos, os valores absolutos dos ΔR s de Santa Helena estão próximos do valor da média, mas que, por sua vez, está entre as que mais se afastam do zero.

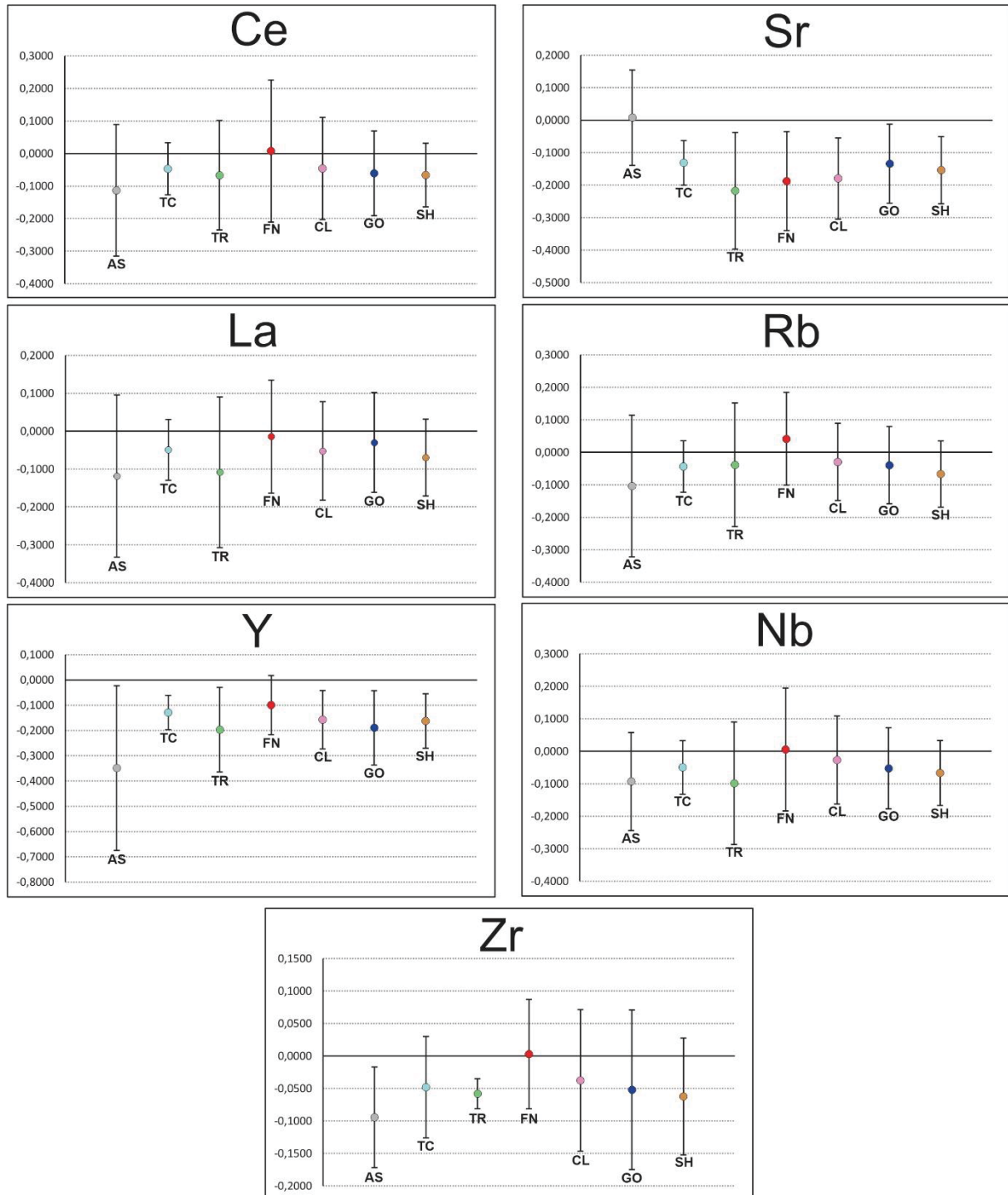


Figura 1.8 – Gráficos da média (círculos coloridos) e desvio padrão (barras) dos ΔR s de cada ilha, organizados por elementos. Os valores exatos e as siglas estão listados na Tabela 1.4

Relação com púmices de Tristão da Cunha e África do Sul.

Púmices estudados por Reagan *et al.* (2008) coletados após uma erupção submarina ocorrida em Tristão da Cunha em 2004 (Hards, 2004, Stewart *et al.*, 2005, e O'Mongain *et al.* 2007) e fragmentos encontrados nas praias da África do Sul, estudados por Frick & Kent (1984), foram utilizados para comparar com as composições geoquímicas dos púmices de CA, PP e IT e demais ilhas oceânicas.

As composições geoquímicas dos púmices da erupção de 2004 (Reagan *et al.*, 2008) e dos púmices classificados no Grupo B de Frick & Kent (1984) estão apresentadas na Tabela 1.5.

Tabela 1.5 – Resultados analíticos dos púmices desse trabalho e os resultados obtidos por Reagan *et al.* (2008) para os púmices gerados após a erupção de 2004 próxima a Tristão da Cunha (2004 púmices), e os resultados do conjunto de púmices do Grupo B de Frick & Kent (1984) (AM2, AM10 e AM55).

Amostra	Camaçari	Ilha da Trindade	Ilha da Trindade	Pontal do Paraná	Púmice de 2004	AM2	AM10	AM55
SiO ₂	62,19	61,38	61,52	62,19	63,16	60,16	61,23	57,64
TiO ₂	0,27	0,25	0,28	0,29	0,47	0,28	0,31	0,29
Al ₂ O ₃	17,82	17,53	17,57	17,74	18,43	17,18	17,32	19,33
Fe ₂ O _{3t}	1,94	2,05	2,00	1,96	2,25	1,80	1,87	1,72
MnO	0,17	0,21	0,18	0,18	0,12	0,12	0,07	0,21
MgO	0,28	0,40	0,43	0,13	0,35	0,40	0,45	0,32
CaO	0,92	0,77	0,87	0,78	1,36	1,28	1,67	1,12
Na ₂ O	7,42	7,75	7,45	7,33	7,11	7,73	8,06	8,40
K ₂ O	5,58	5,32	5,49	5,48	6,70	6,80	4,93	5,73
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,01	0,10	0,07
LOI	3,963	4,29	4,667	3,788		2,84	2,89	3,37
Total	100,6	99,99	100,5	99,9	97,90	98,60	98,90	98,20
Sc	< 1	< 1	< 1	< 1	1,4			
V	10	9	11	9	14,7			
Cr	< 20	< 20	< 20	< 20	0,0			
Co	158	90	110	101	0,2			
Ni	< 20	< 20	< 20	< 20	0,3			
Cu	< 10	< 10	< 10	< 10	2,2			
Zn	100	130	110	110	64,7	72,0	52,0	50,0
Ga	29	33	30	31	23,6			
Cs	3	4	3,2	3,3	1,9			
Rb	234	285	246	249	167,0	217,0	230,0	238,0
Ba	12	9	9	10	104,0			
Sr	14	12	13	7	81,0	37,0	67,0	29,0
Pb	16	21	18	18	13,6	27,0	20,0	16,0
Th	39,4	50,4	44,3	43,2	22,8	42,0	44,0	47,0
U	9,1	11,8	9,8	9,9	5,1			

Nb	193	227	206	197	148,0	248,0	266,0	272,0
Ta	9,6	8,5	9,1	8,6	8,5			
La	173	185	203	178	114,0			
Ce	228	229	256	230	176,0			
Pr	15,7	14,3	16,4	15,4	16,1			
Nd	37,2	31,4	36,4	35,7	44,3			
Zr	748	852	715	817	726,0	625,0	646,0	626,0
Hf	16,9	19,6	17,1	17,8	14,1			
Sm	3,7	3	3,5	3,7	4,9			
Eu	0,5	0,4	0,5	0,5	1,1			
Gd	2,4	1,9	2,2	2,4	3,2			
Tb	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5			
Dy	2,6	2,2	2,4	2,6	2,9			
Ho	0,58	0,52	0,56	0,58	0,60			
Er	2,08	1,95	1,91	1,98	1,75			
Tm	0,346	0,347	0,347	0,345	0,32			
Yb	2,7	2,69	2,61	2,64	2,08			
Lu	0,455	0,471	0,474	0,447	0,35			
Y	19,1	18,7	18,9	19,1	19,30	21,00	21,00	22,00

A Figura 1.9 leva em consideração apenas os diagramas Nb vs. Nb/Y e Zr vs. Zr/Y, já que as análises das amostras de Frick & Kent (1984) não apresentam os teores de La. Nestes diagramas, a proximidade e o alinhamento das amostras são mantidos com a inserção das amostras dos outros estudos. No diagrama Nb vs. Nb/Y, as amostras do litoral brasileiro estão mais próximas dos púmices do Grupo B da África do Sul, e se afastam levemente da amostra da erupção de 2004, que está inserida no campo geoquímico do Grupo Tristão da Cunha. A proximidade dessas amostras com o campo geoquímico de Tristão da Cunha é mantida, como observado na Figura 1.6.

No diagrama Zr vs. Zr/Y, a amostra de 2004 está próxima às amostras de IT e CA. Estas se afastam levemente das composições dos fragmentos da África do Sul, que são englobadas pelos campos geoquímicos de Tristão da Cunha e Linha Camarões.

Em diagrama multielementar para ETRs normalizado pelo condrito de Nakamura (1974), são comparadas as composições dos púmices do litoral do Brasil com a amostra da erupção de 2004, já que as amostras do grupo B da África do Sul não foram analisadas para esses elementos (Figura 1.10). Observa-se suave diferença entre o padrão da amostra de 2004 e os púmices do Brasil. As diferenças

se dão pelo menor enriquecimento em ETRL, fraca anomalia negativa de Eu, além de empobrecimento em ETRP.

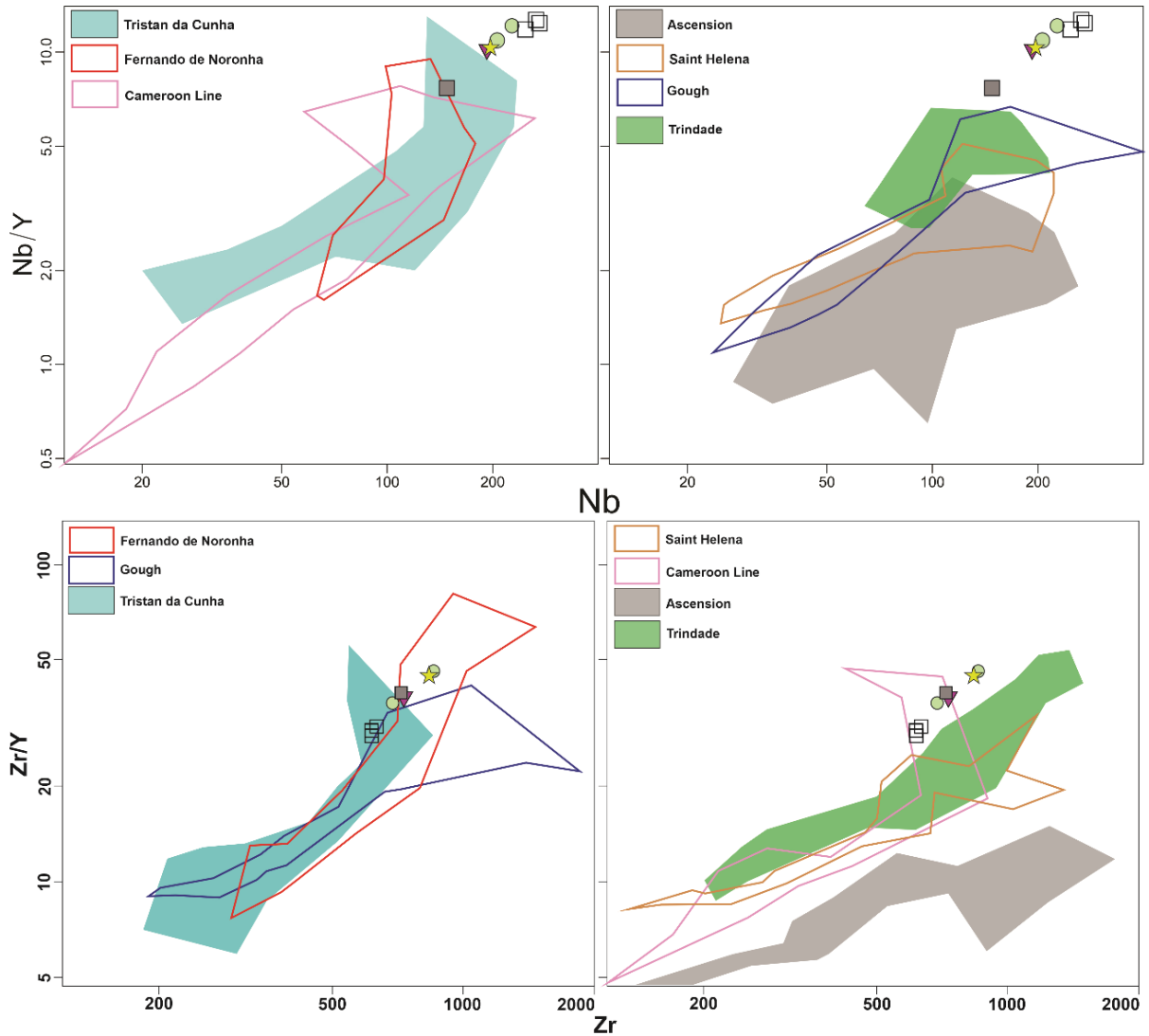


Figura 1.9 – Composições dos púncices do litoral brasileiro, do Grupo B da África do Sul (Frick & Kent, 1984) e da erupção de 2004 próxima a Tristão da Cunha (Reagan *et al.*, 2008). Símbolos: Pontal do Paraná (estrela), Camaçari (triângulo), Ilha da Trindade (círculos), África do Sul (quadrados vazios) e erupção de 2004 (quadrado cheio).

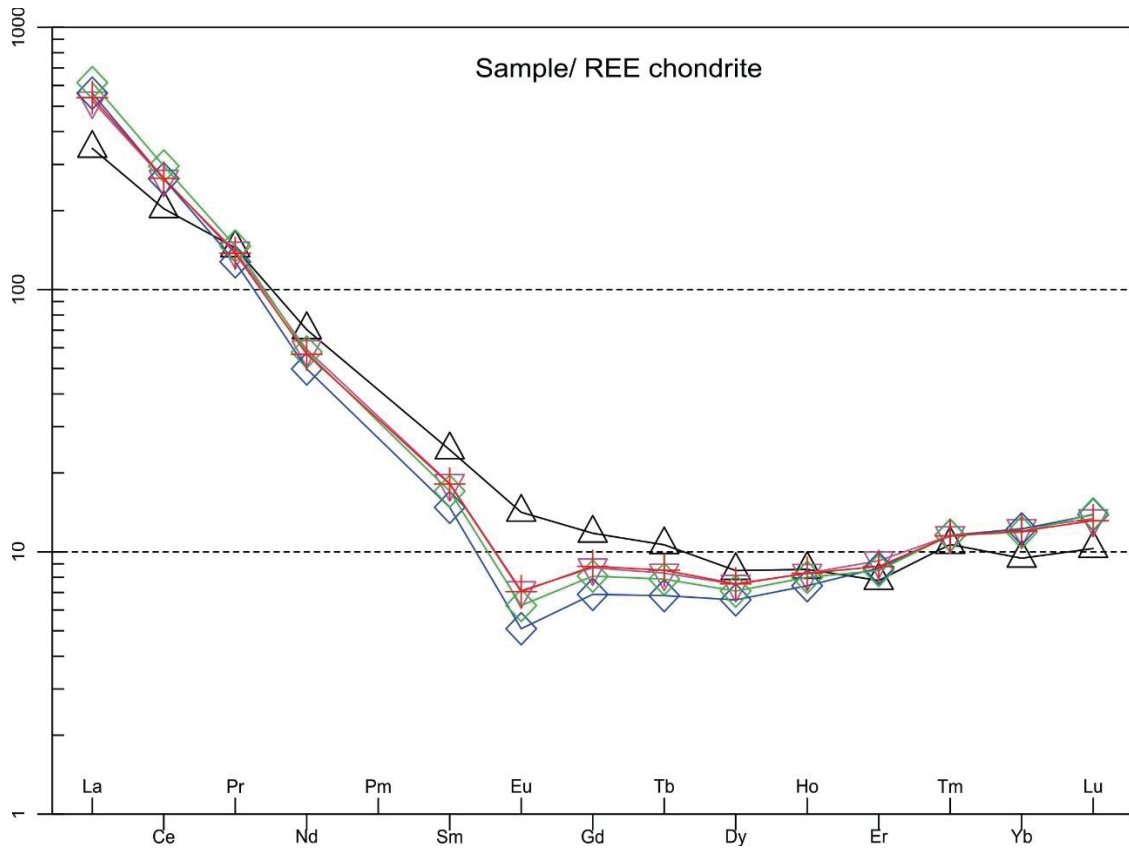


Figura 1.10 – Diagrama multielementar para ETRs normalizado pelo condrito de Nakamura (1974) comparando as amostras da erupção de 2004 e os púmices do Brasil. Símbolos: Púmices de Pontal do Paraná (Cruz vermelha); Camaçari (Triângulo roxo); Ilha da Trindade (Losangos verde e azul); Tristão da Cunha (triângulo preto).

2.1.5 Discussão

Os resultados obtidos a partir das simulações de dispersão oceânica permitem reconhecer quais ilhas poderiam gerar púmices que chegariam ao litoral brasileiro.

Das oito ilhas oceânicas do Atlântico Sul, apenas Bouvet não geraria púmices que chegariam até o litoral do Brasil, mesmo considerando tempo limite duas vezes superior ao estipulado por Risso *et al.* (2002) para fragmentos de 11 cm de diâmetro. Isso permite excluir Bouvet da comparação geoquímica, já que fisicamente púmices formados na Ilha Bouvet não poderiam chegar a IT, CA e PP.

A área de dispersão a partir do arquipélago de Fernando de Noronha, apesar de se afastar do litoral leste do Brasil, foi mantida na pesquisa por estar muito próximo ao litoral brasileiro. Para as demais ilhas, seria possível gerar púmices que chegariam a PP, CA e IT dentro do tempo estipulado.

Os púmices possuem assinaturas geoquímicas muito semelhantes. Como observado na Figura 1.5, todos os padrões, de enriquecimento/empobrecimento e anomalias positiva/negativa, sobrepõem-se quase inteiramente, o que permite concluir que foram gerados pela mesma fonte e pelo mesmo evento vulcânico. Estes padrões geoquímicos, caracterizados por forte enriquecimento de ETR leves (principalmente La e Ce), enriquecimento de LILE (e.g. Cs, Rb, U e Nb) em relação aos HFSE e anomalias negativas de Eu, Ba, Sr, P e Ti, indicam que o magma gerador destes fragmentos passou por forte fracionamento geoquímico, enriquecendo elementos mais incompatíveis em relação aos menos incompatíveis, representando termos mais evoluídos a partir de magmas parentais do tipo OIB (Wilson, 2007). A linha de divisão entre rochas alcalinas e subalcalinas de Irvine & Baragar (1971) (Figura 1.4) demonstra a alta alcalinidade.

Quando se compara a geoquímica dos púmices com as ilhas do Atlântico Sul, as composições que mais se aproximam dos púmices são as do Grupo Tristão da Cunha.

Nos diagramas da Figura 1.6, o aumento das razões entre elementos traço proporcionalmente ao aumento dos teores do elemento incompatível das abcissas indica fracionamento geoquímico da fonte (Cox *et al.*, 1979). Quando se compara a tendência observada dos púmices com as ilhas oceânicas, é possível notar que estas amostras se alinham com a tendência evolutiva do Grupo Tristão da Cunha. Mesmo que os fragmentos também estejam englobados pelos campos geoquímicos de Fernando de Noronha e Linha Camarões no diagrama Zr vs. Zr/Y, não se observa relação clara entre as amostras e estas ilhas nos diagramas Nb vs. Nb/Y e La vs. La/Y. Por outro lado, quando se compara a disposição dos púmices em relação a Tristão da Cunha, embora não estejam englobadas, nos três diagramas as amostras se encontram próximas e alinhadas com a tendência de cristalização do Grupo de ilhas. O mesmo se observa nos diagramas de variação considerando as razões entre elementos traço (Figura 1.7), onde Tristão da Cunha é a única ilha que engloba, em seus termos mais enriquecidos, a composição de dois dos quatro púmices nos dois diagramas. Isto corrobora a interpretação de que estes fragmentos vulcânicos podem representar o termo mais enriquecido do sistema magmático abaixo de Tristão da Cunha, produtos de processos mais avançados de fracionamento geoquímico desta fonte.

A associação entre a geoquímica dos púmices com o Grupo Tristão da Cunha também é observada a partir da análise estatística, sendo que Tristão da Cunha é a ilha cujos valores do Coeficiente de Correlação de Spearman são os menos modificados quando se insere os púmices nos cálculos, considerando média e desvio padrão.

Estatisticamente, Ascensão e Santa Helena são as ilhas com as maiores médias de variação dos coeficientes de correlação (ΔR_s) além de elevados desvios padrões (Figura 1.8) e, portanto, menos correlacionáveis. A mesma relação é observada nos diagramas geoquímicos, onde os campos de Ascensão e Santa Helena se afastam da composição dos púmices (Figuras 1.6 e 1.7).

As ilhas Gough e Trindade, que nos diagramas geoquímicos (Figuras 1.6 e 1.7) se encontram em posições intermediárias na disposição dos campos, também possuem médias de ΔR_s e desvios padrões com valores intermediários, e que estão pouco correlacionadas aos púmices (Figura 1.8).

Fernando de Noronha e Linha Camarões possuem proximidade nas suas características geoquímicas em relação aos púmices, como observado nos diagramas geoquímicos (Figuras 1.6 e 1.7) e nas análises estatísticas (Figura 1.8). Contudo, é possível afirmar que nenhuma das duas é mais correlacionável com os púmices do que Tristão da Cunha.

A partir dos diagramas que comparam as composições dos púmices desse estudo com as amostras de Reagan *et al.* (2008) e Frick & Kent (1984) (Figura 1.9), é possível observar que o alinhamento formado pelas amostras da costa do Brasil é mantido com a inclusão das amostras dos outros estudos e estas se mantêm alinhadas com o campo geoquímico de Tristão da Cunha, dando sequência à tendência evolutiva desse Grupo de ilhas. Assim, a similaridade geoquímica entre essas amostras pode indicar que estão relacionadas a um mesmo sistema magmático, possivelmente o de Tristão da Cunha. Contudo, não podem ter sido gerados a partir do mesmo pulso magmático, já que existem diferenças geoquímicas, como observado no diagrama multielementar para ETRs da Figura 1.10.

Devido ao fato de que os púmices de PP, CA e IT têm a mesma composição e estão depositados em locais distantes na costa brasileira (Figura 1.1), é provável que mais fragmentos estejam espalhados pela costa leste do Brasil. Assim, eventuais púmices que venham a ser encontrados neste litoral possivelmente terão relação com o vulcanismo de Tristão da Cunha.

Há que se considerar que o presente trabalho não leva em consideração vulcões submarinos, que são pouco estudados. À medida que novos dados de vulcões submarinos estiverem disponíveis, estes poderão ser utilizados para aprimorar esta pesquisa.

Outros tipos de análise, como geoquímica isotópica, também poderiam auxiliar fortemente na definição mais precisa da fonte dos púmices, já que cada ilha oceânica possui assinaturas isotópicas particulares.

2.1.6 Conclusões

As conclusões obtidas nessa pesquisa podem ser sintetizadas em quatro itens, apresentados a seguir:

- Os púmices encontrados nas praias de Pontal do Paraná, Camaçari e Ilha da Trindade possuem forte similaridade geoquímica e provavelmente estão associados a uma mesma fonte magmática e a uma mesma erupção.
- Em comparação com as ilhas oceânicas do Atlântico Sul, os púmices estão mais correlacionados geoquímica e estatisticamente com o Grupo Tristão da Cunha, o que torna este Grupo de ilhas a provável fonte desses fragmentos.
- Fragmentos estudados em Tristão da Cunha (Reagan *et al.*, 2008) e África do Sul (Frick & Kent, 1984) possuem similaridades geoquímicas com os púmices do litoral do Brasil, indicando que estes fragmentos podem ter se formado a partir de uma mesma fonte, mas não a partir de um mesmo evento.
- As correntes oceânicas superficiais pertencentes ao Giro Subtropical do Atlântico Sul possibilitam que púmices gerados em Tristão da Cunha sejam transportados através do Atlântico Sul em um trajeto no sentido anti-horário, alcançando a costa leste do Brasil em aproximadamente 2,8 anos.

2.1.7 Referências

Aka, F. T., Nagao, K., Kusakabe, M., Sumino, H., Tanyileke, G., Ateba, B. 2004. Symmetrical helium isotope distribution on the Cameroon volcanic line, West Africa. *Chem. Geol.* 203, 205–223.

- Almeida, F. F. M. 1955. Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Almeida, F. F. M. 1961. Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade. Rio de Janeiro: DNPM.
- Angulo, R. J. Vasconcellos, E. M. G. 1998. Ocorrência de púmices em cordões litorâneos holocênicos no litoral do Estado do Paraná. In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte. Anais do XL Congresso Brasileiro de Geologia. p.259 – 259
- Atkin, F. B., Baker, P. E., Bell, J. D., Smith, D. G. W. 1964. Oxford expedition to Ascension Island. *Nature* 204, 722–724.
- Ayres M., Ayres Junior M., Ayres D.L., Santos A.S. 2007. Bioestat 5.0 - Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas. ONG Mamiraua, Belém, PA. 364p.
- Baker, P. E., Gass, I. G., Harris, P. G., Le Maitre, R. W. 1964. The volcanological report of the Royal Society expedition to Tristan da Cunha, 1962. *Philos. Trans. R. Soc. A* 256, 439–575.
- Baker, P. E., Tomblin, J. F. 1964. A recent volcanic eruption on Bouvetøya, South Atlantic Ocean. *Nature* 203, 1055–1056.
- Baker, I., Gale, N. H., Simons, J. 1967. Geochronology of the St. Helena volcanoes. *Nature* 215, 1451–1454.
- Baker, I. 1969. Petrology of the volcanic rocks of Saint Helena Island, South Atlantic. *Geol. Soc. Am. Bull.* 80, 1283–1310.
- Bongiolo, E.M., Pires, G. L. C., Geraldés, M. C., Santos, A. C., Neumann, R., 2015. Geochemical modeling and Nd-Sr data links nephelinite-phonolite successions and xenoliths of Trindade Island (South Atlantic Ocean, Brazil). *J. Volcanol. Geother. Res.* 306, 58-73.
- Bryan SE, Cook A, Evans J, Colls P, Lawrence M,. 2004. Pumice rafting and faunal dispersion during 2001–2002 in the southwest Pacific: record of a dacitic submarine explosive eruption from Tonga. *Earth Planet. Sci. Lett.* 227: 135–154.
- Chaffey, D. J., Cliff, R. A., Wilson, B. M. 1989. Characterisation of the St Helena magma source. *Magmatism in the Ocean Basins*, Vol. 42, eds A. D. Saunders and M. J. Norry (London: Geological Society of London), 257–276.
- Chamberlain, K. J., Barclay, J., Eason, D. E., Brown, R. J., Davidson J. P., 2016. Origin and Evolution of silicic magmas at ocean islands: perspectives from a zoned fall deposit on Ascension Island, South Atlantic. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 327, 349-360.
- Chauvel, C., Dia, A. N., Bulourde, M., Chabaux, F., Durand, S., Ildefonse, P. 2005. Do decades of tropical rainfall affect the chemical compositions of basaltic lava flows in Mt Cameroon? *J. Volcanol. Geother. Res.* 141, 195–223.

- Cliff, R. A., Baker, P. E., Mateer, N. J. 1991. Geochemistry of Inaccessible Island Volcanics. *Chem. Geol.* 92, 251-260.
- Cordani, U. G. 1970. Idade do vulcanismo no Atlântico Sul. *Boletim IGA* 1, 9–75.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. London: Allen & Unwin.
- Daly, R. A. 1925. The geology of Ascension Island. *Proc. Am. Acad. Arts Sci.* 60, 1–80.
- Déruelle, B., Moreau, C., Nkoumbou, C., Kambou, R., Lisssom, J., Njonfang, E. 1991. The Cameroon Line: a review. *Magmatism in Extensional Structural Settings. The Phanerozoic African Plate*, eds A. B. Kampunzu and R. Lubala (Berlin: Springer), 274–327.
- Déruelle, B., Ngounouno, I., Demaiffe, D. 2007. The ‘Cameroon Hot Line’ (CHL): a unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *Comptes Rendus Geosci.* 339, 589–600.
- Fauria, K.E., Manga, M., Wei, Z., 2016. Trapped bubbles keep pumice afloat and gas diffusion makes pumice sink. *Earth and Planetary Science Letters.* 460 (2017) 50-59.
- Fisher, R., Schmincke, H., 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer, Berlin. 472p.
- Fitton, J. G., Hughes, D. J., 1977. Petrochemistry of the volcanic rocks of the Island of Principe, Gulf of Guinea. *Contrib. Mineral. Petrol.* 64, 257-272.
- Fitton J. G., 1987. The Camerron Line, West Africa: a comparison between oceanic and continental alkaline volcanism. *Spec. Publ. Geol. Soc. London.* 30, 273-291.
- Frick, C., Kent, L.E., 1984. Drift pumice in the Indian and South Atlantic Oceans. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* 87, 19-33
- Gass, I. G. 1967. Geochronology of the Tristan da Cunha group of islands. *Geol. Mag.* 104, 160–170.
- Halliday, A. N., Lee, D.C, Tommasini, S., Davies, G. R., Paslick C. R., Fitton J. G., James, D. E., 1995. Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichment in the sub-oceanic mantle. *Earth Plant. Sci. Lett.* 133, 379-395.
- Hards, V.L. 2004. Assessment of volcanic activity in the wake of the seismic episode of 29/30 July 2004 on Tristan da Cunha, South Atlantic Ocean. *British Geological Survey Commissioned Report CR/04/235*, 20 pp
- Harris, C. 1983. The petrology of lavas and associated plutonic inclusions of Ascension Island. *J. Petrol.* 24, 424–470.

- Hartt, C.F., 1870. *Geology and Physical Geography of Brazil*. Ed. Fields Osgood and Co. Boston.
- Hedberg, J. D. 1969. *A Geological Analysis of the Cameroon Trend*. Ph.D. thesis, Princeton University, Princeton, NJ, 188.
- Hicks, A., Barclay, J., Mark, D. F., Loughlin, S. 2012. Tristan da Cunha: constraining eruptive behaviour using the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique. *Geology* 40, 723–726.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971 A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523-48.
- Janoušek, V., Farrow, C.M., Erban, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6): 1255-1259.
- Jeffery, A.J., Gertisser, R. 2018. Peralkaline Felsic Magmatism of the Atlantic Islands. *Front. Earth Sci.* 6:145.
- Jicha B. R., Singer B. S., Valentine M. J. 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of subaerial Ascension Island and a re-evaluation of the temporal progression of basaltic to rhyolitic volcanism. 54, 2581-2596.
- Jokiel, P.L., Cox, E.F., 2003. Drift pumice at Christmas Island and Hawaii: evidence of oceanic dispersal patterns. *Marine Geology*. 202,121-133
- Kar, A., Weaver, B., Davidson, J., Colucci, M. 1998. Origin of differentiated volcanic and plutonic rocks from Ascension Island, South Atlantic Ocean. *J. Petrol.* 39, 1009–1024.
- Kawabata, H., Hanyu Takeshi, Chang Qing, Kimura, J.I., Nichols, A.R., Tatsumi, Y. 2011. The petrology and geochemistry of St. Helena alkali basalts: evaluation of the oceanic crust-recycling model for HIMU OIB. *J. Petrol.* 52, 791-838.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.* 27, 745–750.
- Le Maitre, R. W. 1962. Petrology of volcanic rocks, Gough Island, South Atlantic. *Geol. Soc. Am. Bull.* 73, 1309–1340.
- Le Roex, A. P. 1985. Geochemistry, mineralogy, and magmatic evolution of the basaltic and trachytic lavas from Gough Island, South Atlantic. *J. Petrol.* 26, 149–186.
- Le Roex, A. P., Cliff, R. A., Adair, B. J. I. 1990. Tristan da Cunha, South Atlantic: geochemistry and petrogenesis of a basanite-phonolite lava series. *J. Petrol.* 31, 779–812.

Lee, D. C., Halliday, A. N., Fitton, G. J., Poli, G. 1994. Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon Line: evidence of the mantle plume origin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 123, 119–138.

Liotard, J. M., Dupuy, C., Dostal, J., Cornen G., 1982. Geochemistry of the volcanic island. Of Annobon, Gulf of Guinea. *Chem. Geol.* 35, 115-128

Lopes, R. P. (2002). O vulcanismo do Arquipélago de Fernando de Noronha, PE:Química Mineral e Geoquímica. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Lopes, R. P., Ulbrich, M. N. C. 2015. Geochemistry of the alkaline volcanic-subvolcanic rocks of the Fernando de Noronha archipelago, Southern Atlantic Ocean. *Braz. J. Geol.* 45, 307–333.

Lopes, R. P., Ulbrich, M. N. C., and Ulbrich, H. (2014). The subvolcanic rocks of the Fernando de Noronha archipelago, southern Atlantic Ocean: mineral chemistry. *Central Eur. J. Geosci.* 6, 422–456. doi: 10.2478/s13533-012-0195-7

Manville, V., White, J.D.L., Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., 1998. The saturation behaviour of pumice and some sedimentological implications. *Sediment. Geol.* 119 (1–2), 5–16.

Marques, L.S., Ulbrich, M.N.C., Ruberti, E., Tassinari, C.G. 1999. Petrology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Trindade and Martim Vaz volcanic rocks (South Atlantic Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 93, 191-216.

Marzoli, A., Peccirillo, E. M., Renne, P. R., Bellieni, G., Iacumin, M., Nyobe, J. B., 2000. The Cameroon Volcanic Line revisited: petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. *J. Petrol.* 41, 87–109.

Maund, J. G., Rex, D. C., Le Roex, A. P., Reid, D. L. 1988. Volcanism on Gough Island: a revised stratigraphy. *Geol. Mag.* 125, 175–181.

McDonough, W.F., Sun, S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.

McPhie, J., Doyle, M., Allen, R., 1993. *Volcanic textures – a guide to interpretation of textures in volcanic rocks.* Tasmania, Tasmanian Gov. Printing Office. 198p.

Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 38(5), 757-775.

Nielson, D. L., Sibbett, B. S. 1996. Geology of ascension Island, South Atlantic Ocean. *Geothermics* 25, 427–448.

O'Mongain A., Ottemoller L., Baptie B., Galloway D., Booth D. (2007) Seismic activity associated with a probable submarine Timescales of fractionation to produce the 2004 Tristan phonolite 4377 eruption near Tristan Da Cunha, July 2004–July 2006. *Seismol. Res. Lett.* 78, 375–382.

- Pearce, J.A., Norry, M.J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.* 69, 33-47.
- Perlingeiro, G., Vasconcelos, P. M., Knesel, K. M., Thiede, D. S., Cordani, U. G. 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Fernando de Noronha Archipelago and implications for the origin of alkaline volcanism in the NE Brazil. *J. Volcanol. Geother. Res.* 249, 140–154.
- Peterson, R.G., Stramma, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanog.* Vol. 26, pp. 1-73
- Pires, G. L. C., Bongiolo, E. M., Gerales, M. C., Renac, C., Santos, A. C., Jourdan, F. 2016. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and revised $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ data from nephelinitic-phonolitic volcanic successions of the Trindade Island (South Atlantic Ocean). *J. Volcanol. Geother. Res.* 327, 531–538.
- Pires, G. L. C., Bongiolo, E. M. 2016. The nephelinitic-phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. *J. South Am. Earth Sci.* 72, 49–62.
- Preece, K., Mark, D. F., Barclay, J., Cohen, B. E., Chamberlain, K. J., Jowitt, C. 2018. Bridging the gap: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of volcanic eruptions from the 'Age of Discovery'. *Geology*.
- Prestvik, T. 1982. Trace element geochemistry of volcanic rocks from Bouvetøya, South Atlantic. *Antarctic Geoscience*, ed. C. Craddock (Madison, WI: The University of Wisconsin press), 771–774.
- Prestvik, T., Goldberg, S., Goles, G. 1999. Petrogenesis of the volcanic suite of Bouvetøya (Bouvet Island), South Atlantic. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 79, 205–218.
- Reagan, M.K., Turner, S., Legg, M., Sims, K.W.W., Hards, V.L. 2008. ^{238}U - and ^{232}Th -decay series constraints on the timescales of crystal fractionation to produce the phonolite erupted in 2004 near Tristan da Cunha, South Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 72, 4367-4378.
- Risso, C., Scasso, R.A., Aparicio, A., 2002. Presence of large pumice blocks on Tierra del Fuego and South Shetland Islands shorelines, from 1962 South Sandwich Islands eruption. *Mar. Geol.* 186, 413-422.
- Rollinson, H. 1995. *Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation.* Longman Scientific and Technical Press. 26.
- Sachs, L. 1984. *Applied statistics: a handbook of techniques.* 2nd edition. Springer-Verlag. New York.
- Suh, C. E., Sparks, R. S. J., Fitton, J. G., Ayonghe, S. N., Annen, C., Nana, R. 2003. The 1999 and 2000 eruptions of Mount Cameroon: eruption behaviour and petrochemistry of lava. *Bull. Volcanol.* 65, 267–283.

- Stewart R., O'Mongain A., Ottemoeller L., Baptie B., Booth D., Hards V. 2005 Detection of an underwater eruption near Tristan Da Cunha using the IMS network. *Geophys. Res. Abstr.* 7, EGU05-A-02392.
- Ulbrich, M. N. C. 1993. Petrography of alkaline volcanic-subvolcanic rocks from the Brazilian Fernando de Noronha archipelago, southern Atlantic Ocean. *Bull. Instit. Geosci. Univ. São Paulo* 24, 77–94.
- van Sebille, E., England, M.H., Froyland, G. 2012. Origin, dynamics and Evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*. 7. 6pp.
- Verwoerd, W. J., Erlank, A. J., Kable, E. J. D. 1976. Geology and geochemistry of Bouvet Island. *Andean and Antarctic Volcanology Problems*, ed. O. Gonzales Ferran (Naples: IAVCEI), 203–237.
- Weaver, B.L. 1987. Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan da Cunha. *Geological Society, London, Special Publications*. 30. 253-267.
- Weaver, B. L. 1990. Geochemistry of highly-undersaturated ocean island basalt suites from the Southern Atlantic Ocean: Fernando de Noronha and Trindade islands. *Contrib. Mineral. Petrol.* 105, 502–515.
- Weaver, B., Kar, A., Davidson, J., Collucci, M. 1996. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ascension Island, South Atlantic Ocean. *Geothermics* 25, 449–470.
- Wilson, M. 2007. *Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach*. Springer. 466 p.
- Witham, A.G., Sparks, R.S.J., 1986. Pumice. *Bull. Volcanol.* 48 (4) 209-223.
- Yamgouot, F.N., Déruelle, B., Mbowou, I.B.G., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2016. Geochemistry of the volcanic rocks from Bioko Island, (“Cameroon Hot Line”): evidence for plume-lithosphere interaction. *Geoscience Frontiers*. 7, 743-757.

2.2 – RESULTADOS COMPLEMENTARES

Este capítulo possui resultados de campo e geoquímica obtidos em trabalho de campo na Ilha da Trindade, entre abril e junho de 2018.

2.2.1 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo se concentraram nos depósitos piroclásticos da Ilha relacionados ao Complexo Trindade, unidade com depósitos piroclásticos mais expressivos da Ilha (Figura 8).

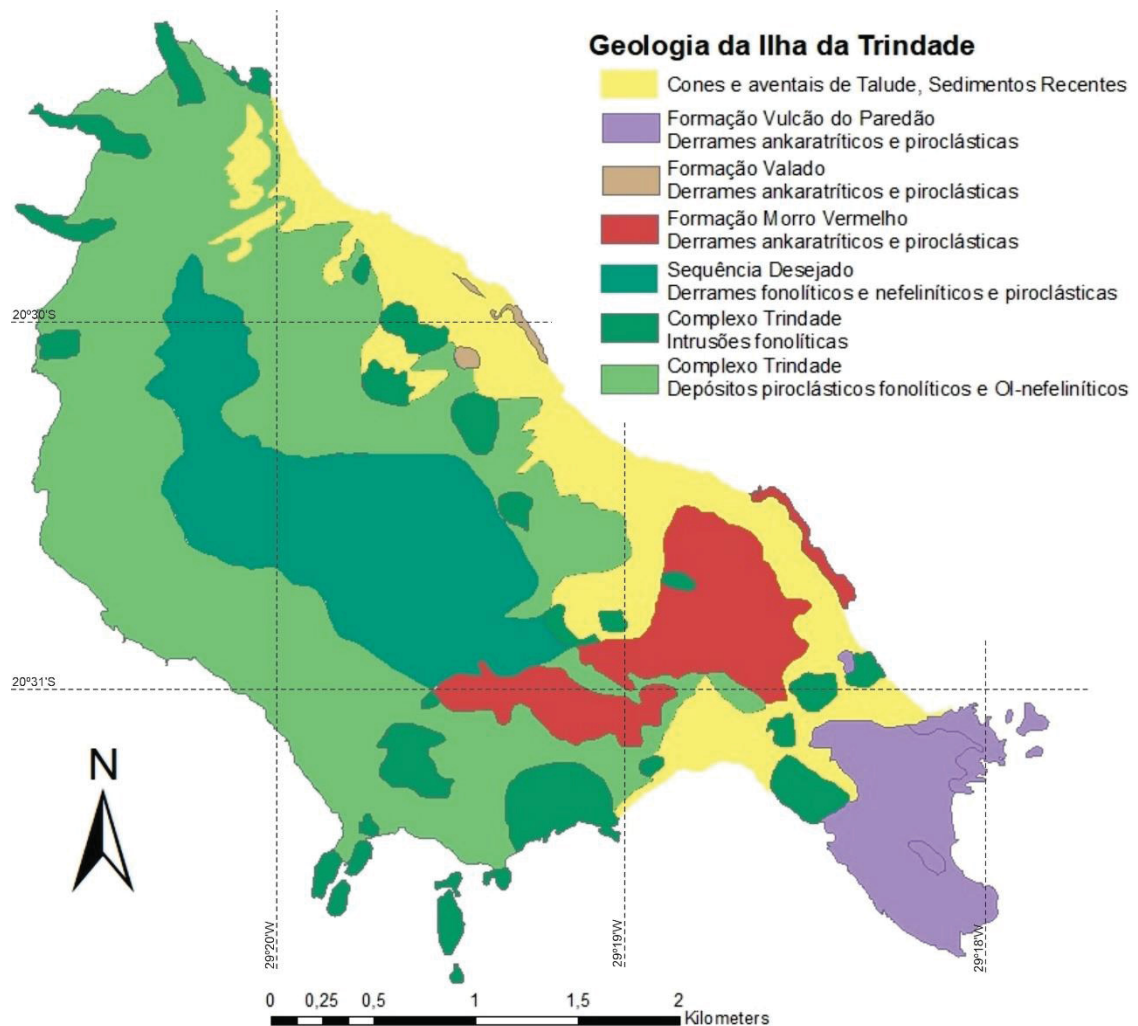


Figura 8 - Geologia da Ilha da Trindade baseado em Almeida (1965) e Pires *et al.* (2016)

Os depósitos piroclásticos do Complexo Trindade são formados por sucessões de (a) tufo-brechas mal selecionadas, compostas por fragmentos de

fonolito tamanho bloco e l pilli, cristaloclastos de feldspato alcalino, piroxênio e biotita tamanhos l pilli e cinza, e fragmentos vítreos não vesiculados tamanho cinza, (b) lapillitos geralmente mal selecionados, compostos por fragmentos de fonolito, ankaratrilo e cristaloclastos, (c) l pilli-tufos mal selecionados, compostos por fragmentos de fonolito, cristaloclastos de feldspato alcalino, piroxênio e biotita e fragmentos vítreos não vesiculados e (e) tufos bem selecionados constituídos por cristaloclastos de feldspato alcalino, piroxênio e biotita e fragmentos vítreos não vesiculados.

As estruturas comumente encontradas são maciças ou de fluxo, quando   definida pela orienta o dos blocos. Também são encontradas estruturas como grada o inversa, grada o normal e lamina o plano-paralela. Em um afloramento ocorrem estruturas piroclásticas primárias como marcas onduladas, antidunas e estratifica es cruzadas.

A partir da confec o de colunas litoestratigráficas (Figura 9) observa-se que nas menores altitudes afloram tufo-brechas que, em alguns locais, são sobrepostas por tufos com estruturas sedimentares. Esta unidade mais basal   geralmente cortada por intrusões fonolíticas, de granula o muito fina a média, com fenocristais de sanidina e nefelina, e estrutura de fluxo, marcada pela orienta o dos fenocristais. Acima destas unidades, em contato erosivo, ocorrem tufos mal selecionados que gradam inversamente a lapillitos e tufo-brechas também mal selecionados. Essas camadas são comumente recobertas por tufos e l pilli-tufos laminados, bem a moderadamente selecionados.

A partir desses levantamentos, constatou-se a ausência de púmices nos depósitos piroclásticos da Ilha da Trindade. Foram encontrados púmices depositados somente nas praias da Ilha (Figura 10).

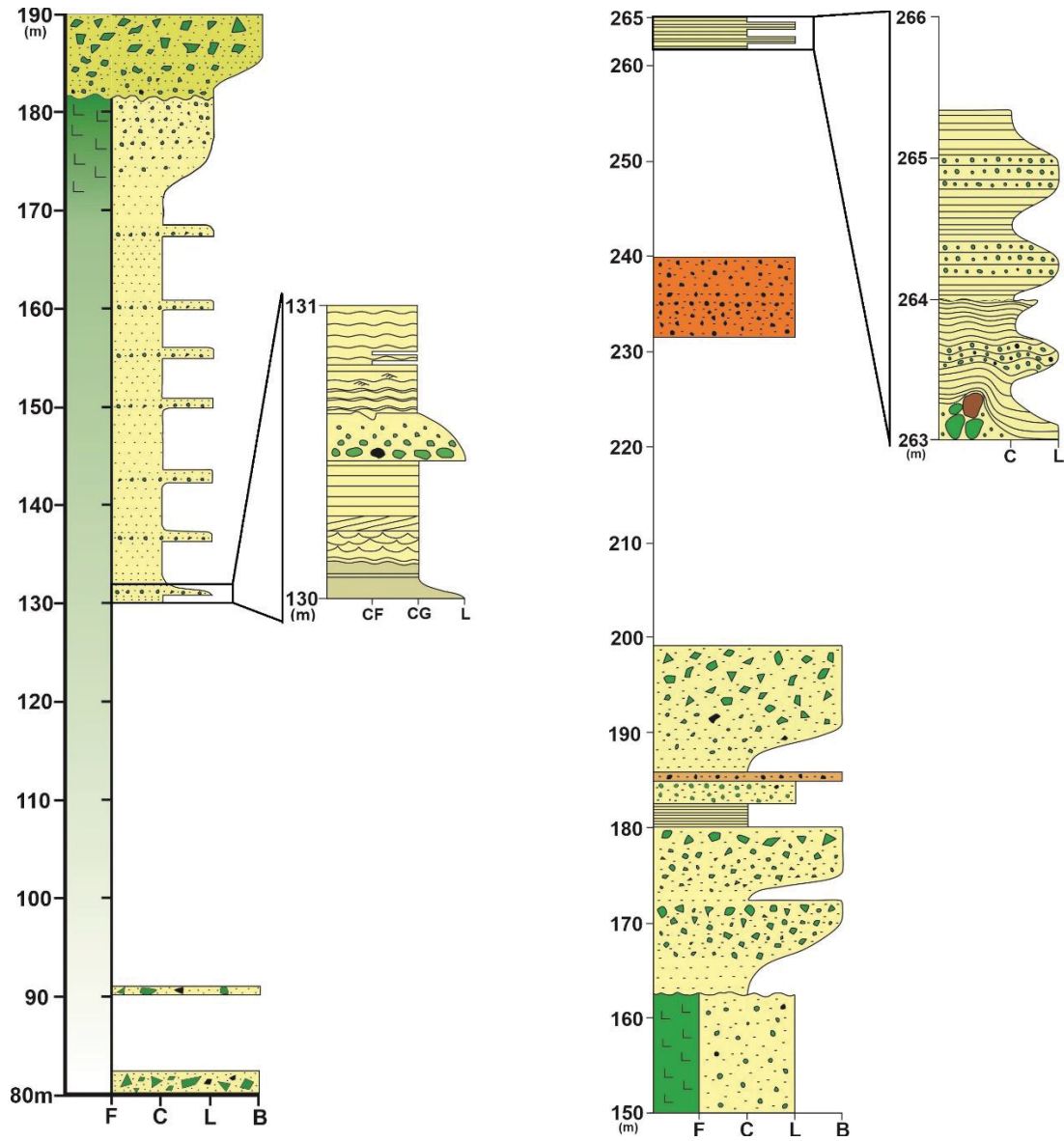


Figura 9 – Colunas litoestratigráficas levantadas no Complexo Trindade. F – Intrusão fonolítica; CF – Cinza fina; CG – Cinza grossa; C – Cinza; L – Lápilli; B – Bloco.



Figura 10 – Púmices (agrupados) encontrados na Praia dos Andradas, na Ilha da Trindade.

2.2.2 Geoquímica.

A Tabela 2 apresenta os resultados analíticos obtidos para as rochas piroclásticas e fonolitos do Complexo Trindade.

Tabela 2 – Resultados analíticos para as rochas piroclásticas e fonolitos da Ilha da Trindade. Rochas piroclásticas: IT-28; IT-29A, IT-29B, IT-29C; IT-36. Fonolitos: IT-29E; IT-41A; IT-44; IT-48

Sample	IT-28	IT-29A	IT-29B	IT-29C	IT-29E	IT-36	IT-41A	IT-44	IT-48
SiO ₂	47,92	46,51	48,59	44,81	53,62	44,81	40,69	45,82	45,29
TiO ₂	0,74	1,06	0,92	3,07	0,81	2,69	4,54	2,87	2,50
Al ₂ O ₃	18,75	16,68	17,60	13,76	20,92	15,46	13,36	16,40	17,62
Fe ₂ O _{3t}	3,73	4,88	4,35	10,25	4,19	9,65	12,88	9,63	8,40
MnO	0,14	0,10	0,12	0,18	0,15	0,19	0,18	0,21	0,24
MgO	1,12	2,17	1,84	4,68	0,75	4,57	6,59	3,11	2,41
CaO	4,92	5,53	4,19	8,51	2,57	4,09	11,91	8,34	7,43
Na ₂ O	1,48	2,11	2,37	2,18	8,74	1,10	2,72	2,65	6,43
K ₂ O	6,60	4,82	5,39	4,07	6,02	5,01	2,25	4,37	4,68
P ₂ O ₅	0,23	0,33	0,25	0,88	0,22	0,88	1,10	0,98	0,72
LOI	14,81	15,61	14,35	7,38	2,16	11,26	4,19	5,40	3,00
Total	100,44	99,80	99,97	99,77	100,15	99,71	100,41	99,78	98,72

Sc	1	4	4	13	2	10	21	7	5
V	74	134	126	306	58	243	321	191	156
Cr	< 20	30	30	100	< 20	60	140	< 20	< 20
Co	38	79	72	75	218	47	108	69	130
Ni	< 20	20	< 20	50	30	30	90	< 20	30
Cu	< 10	10	10	20	< 10	30	60	10	10
Zn	120	110	140	160	130	170	130	160	150
Ga	31	26	30	25	37	40	23	29	28
Cs	1,6	0,6	0,3	0,8	2,3	1,7	0,8	5,9	1,2
Rb	196	209	263	146	181	151	42	105	92
Ba	775	874	728	956	787	1762	841	1184	1519
Sr	1170	1596	1488	1349	1313	1251	1307	2422	2868
Pb	15	10	14	7	17	20	< 5	10	8
Th	22,1	18,5	20,7	13,4	26,8	28,4	8,1	18,4	17,8
U	7,1	5,5	5,3	7,6	10	6,7	2,9	4,1	6,0
Nb	142	121	126	136	122	205	113	193	222
Ta	3,6	3,6	3,5	6,8	4,9	7,8	7,1	9,7	13,1
La	91,7	81,9	89,5	102	85,3	203	85,7	145	190
Ce	135	125	135	185	130	343	175	264	351
Pr	11,6	11,3	11,8	20,1	11,5	35,7	19,9	27,6	35,8
Nd	36,6	37,5	36,5	75,3	37,9	127	79,1	101	127
Zr	829	652	700	650	915	710	423	720	782
Hf	13	11,6	12,1	12,1	16,2	12,5	9,4	13,6	14,3
Sm	5,5	6,0	5,7	13	5,9	20,9	14,8	17,2	20,1
Eu	1,7	1,8	1,7	3,9	1,8	6,2	4,5	5,1	5,9
Gd	4,5	4,7	4,6	10,6	4,5	15,4	11,4	13,1	14,9
Tb	0,7	0,7	0,6	1,5	0,7	2,0	1,5	1,8	2,0
Dy	4,1	4,1	3,9	7,7	3,8	10,4	8,0	9,4	10,8
Ho	0,8	0,8	0,7	1,4	0,7	1,8	1,3	1,6	1,8
Er	2,4	2,3	2,2	3,8	2,2	4,7	3,3	4,2	5,0
Tm	0,4	0,3	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	0,6	0,6
Yb	2,7	2,4	2,3	3,1	2,5	3,7	2,4	3,4	3,9
Lu	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5
Y	24,6	24,6	22,9	40	22,2	53,2	35,6	45,4	51,6

Utilizando os mesmos diagramas propostos no artigo, observa-se que as amostras analisadas, piroclásticas e fonolitos, são correlacionáveis com o campo geoquímico da Ilha da Trindade. Por outro lado, as amostras de púmices, incluindo os fragmentos coletados nas praias da própria Ilha, projetam-se de forma deslocada nos diagramas não são correlacionáveis com este grupo de amostras (Figura 11 e Figura 12).

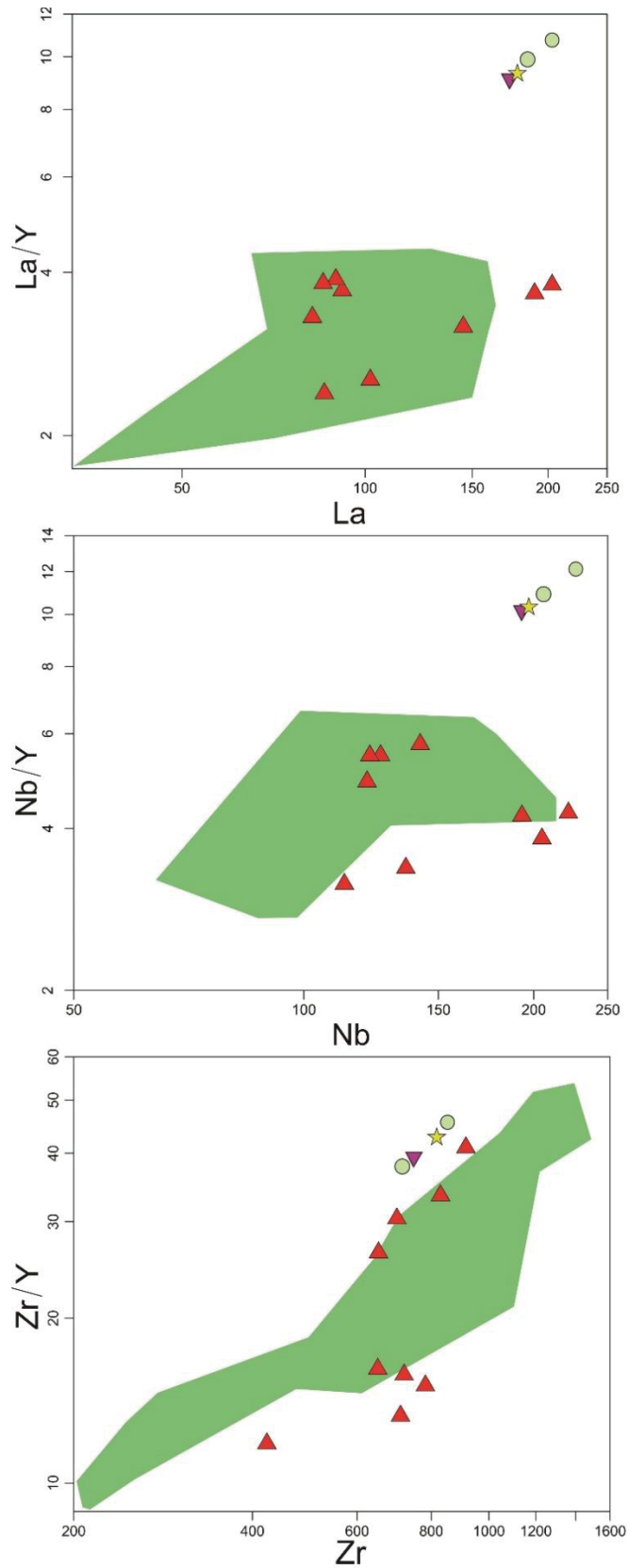


Figura 11– Geoquímica das amostras de púmices projetadas em relação às amostras analisadas da Ilha da Trindade e o campo geoquímico da Ilha delimitado em verde (Referências no artigo). Pontal do Paraná (estrela); Camaçari (Triângulo roxo); Ilha da Trindade (círculos verdes); Rochas piroclásticas e fonolitos da Ilha da Trindade (triângulos vermelhos); Campo geoquímico da Ilha da Trindade (campo verde).

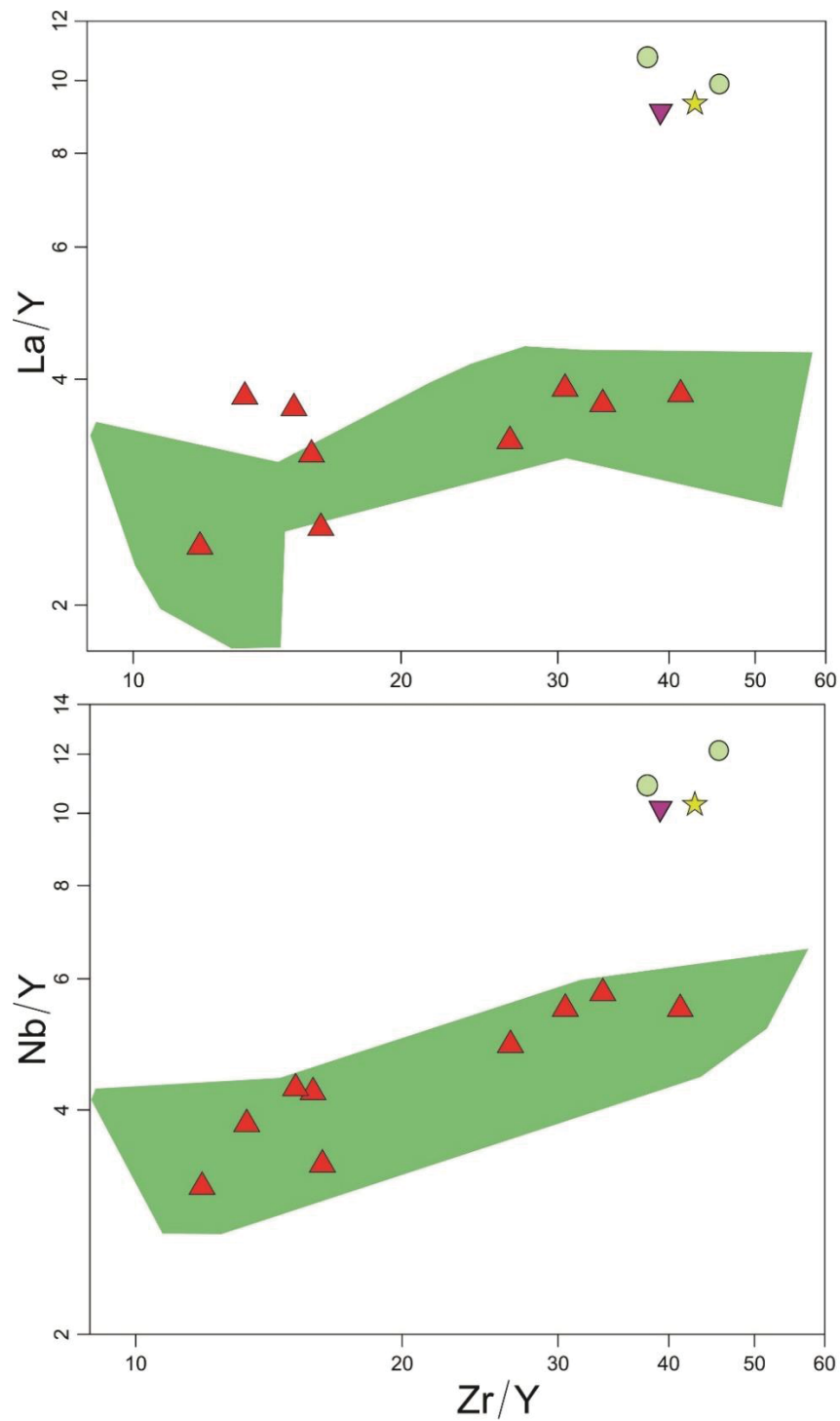


Figura 12 – Geoquímica das amostras de púmices projetadas em relação às amostras analisadas da Ilha da Trindade e o campo geoquímico da Ilha. Símbolos apresentados na Figura 11

3 CAPÍTULO 3 – DISCUSSÃO INTEGRADA E CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.1 VULCANISMO FONOLÍTICO DA ILHA DA TRINDADE E OS PÚMICES

Os depósitos piroclásticos estudados no Complexo Trindade (Ilha da Trindade), sintetizados na Figura 9, são constituídos por tufo-brechas, lapillitos e lápilli-tufos, mal selecionados que, em alguns níveis possuem gradação inversa, indicando fluxos de alta densidade (Fischer & Schmincke, 1984). Estes depósitos são geralmente recobertos por unidades de tufo estratificado, em vários casos com estruturas sedimentares, como estratificação plano-paralela, estratificação cruzada e *ripples* que, por sua vez, indicam fluxos trativos de alta energia, sendo caracterizados como *surges* piroclásticos (Fischer & Schmincke, 1984). Nessa sequência não são encontradas camadas com fragmentos de vidro vesiculado (púmices).

Essa sequência geralmente observada no Complexo Trindade, com tufo-brechas recobertas por tufos estratificados, é gerada a partir de fluxos piroclásticos do tipo *block-and-ash flows* seguidos por fluxos de *ash-cloud surges*, comuns em depósitos formados a partir de colapso de domos, podendo ser gravitacionais ou por erupções rápidas e violentas. Colapso de domos, por sua vez, são gerados por erupções do tipo vulcaniana, que ocorrem a partir de magmas de composição intermediária e com teores relativamente baixos de voláteis magmáticos (Fisher e Schmincke (1984), Fisher e Heiken (1982), Sigurdsson *et al.* (2007)). Pires *et al.* (2016) classificam os depósitos piroclásticos fonolíticos da Ilha da Trindade como de estilo vulcaniano. Dessa forma, mesmo o estilo eruptivo mais explosivo ocorrido na Ilha da Trindade não teria gerado quantidade expressiva de púmices.

As dificuldades de acesso e alta periculosidade encontradas nos trabalhos de campo realizados da Ilha da Trindade, além da quantidade expressiva de depósitos de talus nas encostas da Ilha, impedem que colunas litoestratigráficas mais detalhadas sejam levantadas.

Os resultados analíticos, apresentados nas Figuras 11 e 12, demonstram que as rochas coletadas na Ilha da Trindade projetam-se dentro ou próximo do campo geoquímico da Ilha, sendo de fácil correlação. Por outro lado, as amostras dos púmices coletados em Camaçari, Pontal do Paraná e Ilha da Trindade estão deslocadas em relação às rochas da Ilha, tendo pouca relação com o campo geoquímico de Trindade.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os púmices encontrados no litoral do Brasil, dentre as ilhas oceânicas do Atlântico Sul, têm maior afinidade geoquímica com o Grupo Tristão da Cunha. Mesmo os púmices coletados nas praias da Ilha da Trindade não possuem correlação com a própria Ilha, sendo de composição compatível com os fragmentos do litoral brasileiro e com Tristão da Cunha.

O estilo eruptivo determinado para os depósitos piroclásticos da Ilha da Trindade permite reconhecer que o vulcanismo ocorrido nesta Ilha não teria gerado quantidades expressivas de púmices.

O sistema oceânico de circulação superficial denominado Giro Subtropical do Atlântico Sul possibilita que fragmentos gerados em Tristão da Cunha sejam transportados no sentido anti-horário através do Atlântico Sul. Estes fragmentos atingiriam inicialmente a costa oeste da África e, posteriormente, seriam carregados até a costa leste do Brasil, alcançando as localidades da Ilha da Trindade, Camaçari e Pontal do Paraná.

Estudos de geoquímica isotópica podem auxiliar na determinação da fonte dos púmices, já que cada ilha oceânica possui assinaturas específicas.

REFERÊNCIAS

- AKA, F. T., NAGAO, K., KUSAKABE, M., SUMINO, H., TANYILEKE, G., ATEBA, B. 2004. Symmetrical helium isotope distribution on the Cameroon volcanic line, West Africa. *Chem. Geol.* 203, 205–223.
- ALMEIDA, F. F. M. 1955. *Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha*. Rio de Janeiro: Serviço Grafico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- ALMEIDA, F. F. M. 1961. *Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade*. Rio de Janeiro: DNPM.
- ALMEIDA, F. F. M. 2012. Ilhas ceânicas brasileiras, in *Geologia do Brasil*, eds Y. Hasui, C. D. R. Caqrneiro, F. F. M. Almeida, A. Bartorelli (São Paulo: Beca), 658–662
- ANDERSON, D.L. 1995. Lithosphere, asthenosphere and perisphere. *Rev. Geophys.* 33. 125-149
- ANGULO, R. J. VASCONCELLOS, E. M. G. 1998. Ocorrência de púmices em cordões litorâneos holocênicos no litoral do Estado do Paraná. In: *XL Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte. *Anais do XL Congresso Brasileiro de Geologia*. p.259 – 259
- ATKIN, F. B., BAKER, P. E., BELL, J. D., SMITH, D. G. W. 1964. Oxford expedition to Ascension Island. *Nature* 204, 722–724.
- AYRES M., AYRES JUNIOR M., AYRES D.L., SANTOS A.S. 2007. *Bioestat 5.0 - Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas*. ONG Mamiraua, Belém, PA. 364p.
- BAKER, P. E., GASS, I. G., HARRIS, P. G., LE MAITRE, R. W. 1964. The volcanological report of the Royal Society expedition to Tristan da Cunha, 1962. *Philos. Trans. R. Soc. A* 256, 439–575.
- BAKER, P. E., TOMBLIN, J. F. 1964. A recent volcanic eruption on Bouvetøya, South Atlantic Ocean. *Nature* 203, 1055–1056.
- BAKER, P.E., 1973. Islands of the South Atlantic. In: *Oceans, Basins and Margins*, Vol. 1, pp. 493–553, eds Nairn, A. & Stelhi, F., Plenum Press, New York
- BAKER, I., Gale, N. H., Simons, J. 1967. Geochronology of the St. Helena volcanoes. *Nature* 215, 1451–1454.
- BAKER, I. 1969. Petrology of the volcanic rocks of Saint Helena Island, South Atlantic. *Geol. Soc. Am. Bull.* 80, 1283–1310.

- BEVAN, S.C. 1961. Eruption near Tristan in 1725. *New Scientist*. 267. 802.
- BISCHOF, B., ROWE, E., MARIANO, A.J., RYAN, E.H. 2004. The Brazil Current. *Ocean Surface Currents*. <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/atlantic/brazil.html>. Acessado em 05/11/2019
- BJØRK, A.A., BJÖRCK, S., CRONHOLM, A., HAILE, J., LJUNG, K., PORTER, C. 2011. Possible Late Pleistocene volcanic activity on Nightingale Island, South Atlantic Ocean, based on geochemical resistivity measurements, sediment corings and ¹⁴C dating. *GFF*. 133. 141–147
- BOEBEL, O., RAE, C.D., GARZOLI, S., LUTJEHARMS, J., RICHARDSON, P., ROSSBY, T., SCHMID, C., ZENK, W. 1998: Float experiment studies interocean exchanges at the tip of Africa. *EOS*, 79, 1, 1, 7-8.
- BONGIOLO, E.M., PIRES, G. L. C., GERALDES, M. C., SANTOS, A. C., NEUMANN, R., 2015. Geochemical modeling and Nd-Sr data links nephelinite-phonolite successions and xenoliths of Trindade Island (South Atlantic Ocean, Brazil). *J. Volcanol. Geother. Res.* 306, 58-73.
- BONHOURE, D., ROWE, E., MARIANO, A.J., RYAN, E.H. 2004. The South Equatorial System Current. *Ocean Surface Currents*. <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/atlantic/south-equatorial.html>. Acessado em 05/11/2019.
- BRYAN SE, COOK A, EVANS J, COLLS P, LAWRENCE M,. 2004. Pumice rafting and faunal dispersion during 2001–2002 in the southwest Pacific: record of a dacitic submarine explosive eruption from Tonga. *Earth Planet. Sci. Lett.* 227: 135–154.
- BRYDEN, H.L., BEAL, L.M., DUNCAN, L.M. 2005. Structure and transport of the Agulhas Current and its temporal variability. *Journal of Oceanography*. 61. 3. 479-492
- CHAFFEY, D. J., CLIFF, R. A., WILSON, B. M. 1989. Characterisation of the St Helena magma source. *Magmatism in the Ocean Basins*, Vol. 42, eds A. D. Saunders and M. J. Norry (London: Geological Society of London), 257–276.
- CHAMBERLAIN, K. J., BARCLAY, J., EASON, D. E., BROWN, R. J., DAVIDSON J. P., 2016. Origin and Evolution of silicic magmas at ocean islands: perspectives from a zoned fall deposit on Ascencion Island, South Atlantic. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 327, 349-360.
- CHAUVEL, C., DIA, A. N., BULOUREDE, M., CHABAUX, F., DURAND, S., ILDEFONSE, P. 2005. Do decades of tropical rainfall affect the chemical compositions of basaltic lava flows in Mt Cameroon? *J. Volcanol. Geother. Res.* 141, 195–223.

- CLIFF, R. A., BAKER, P. E., MATEER, N. J. 1991. Geochemistry of Inaccessible Island Volcanics. *Chem. Geol.* 92, 251-260.
- COLLING, A. 2001. Ocean circulation: prepared by an Open University course team, 2nd Edition. Elsevier.
- COOMBS, D.S., LANDIS, C.A. 1966. Pumice of the South Sandwich eruption of March 1962 reaches New Zealand. *Nature.* 209. 289-295.
- CORDANI, U. G. 1970. Idade do vulcanismo no Atlântico Sul. *Boletim IGA* 1, 9–75.
- COX, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks.* London: Allen & Unwin.
- DALY, R. A. 1925. The geology of Ascension Island. *Proc. Am. Acad. Arts Sci.* 60, 1–80.
- DARWIN, C.R. 1845. *Journal of Researches into the Natural History and Geology of the Various Countries Visited during the Voyage of HMS Beagle Round the World*, 2nd Edn. London: John Murray, 324
- DARWIN, C. R. 1846. *Geological observations on South America. Being the third part of the geology of the Voyage of the Beagle under the command of Capt. Fitzroy, R.N. during the years 1832 to 1836.* London: Smith Elder and Co
- DAUFENBACH, H.F., VASCONCELLOS, E.M.G., ANGULO, R.J., SOUZA, M.C., 2018. Proveniência de púmices em cordão litorâneo holocênico em Pontal do Paraná-PR. In: *Anais do XLIX Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro, RJ.
- DAUFENBACH, H.F., VASCONCELLOS, E.M.G., ANGULO, R.J., SOUZA, M.C., 2019. Estudo da relação geoquímica entre púmices de Pontal do Paraná (PR), Nightingale Island (Tristão da Cunha) e da África do Sul. In: *Anais do XI Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, Bento Gonçalves, RS.
- DÉRUELLE, B., MOREAU, C., NKOUMBOU, C., KAMBOU, R., LISSOM, J., NJONFANG, E. 1991. The Cameroon Line: a review. *Magmatism in Extensional Structural Settings. The Phanerozoic African Plate*, eds A. B. Kampunzu and R. Lubala (Berlin: Springer), 274–327.
- DÉRUELLE, B., NGOUNOUNO, I., DEMAIFFE, D. 2007. The 'Cameroon Hot Line' (CHL): a unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *Comptes Rendus Geosci.* 339, 589–600.
- DIAS, C.A., 1983a. Note on the evidence of a permanent southward flow of the upper oceanic tropospheric waters off Angola at 12°S. *Collection of Scientific Papers International Commission for the Southeast Atlantic Fisheries*, 10, 99-102.

- FAURIA, K.E., MANGA, M., WEI, Z., 2016. Trapped bubbles keep pumice afloat and gas diffusion makes pumice sink. *Earth and Planetary Science Letters*. 460 (2017) 50-59.
- FISHER, R., SCHMINCKE, H., 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer, Berlin. 472p.
- FISHER, R., HEIKEN, G. 1982. Mt. Peleé, Martinique: May 8 and 20, 1902, Pyroclastic flows and surges. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 13, 339-371.
- FITTON, J. G., HUGHES, D. J., 1977. Petrochemistry of the volcanic rocks of the Island of Principe, Gulf of Guinea. *Contrib. Mineral. Petrol.* 64, 257-272.
- FITTON J. G., 1987. The Camerron Line, West Africa: a comparison between oceanic and continental alkaline volcanism. *Spec. Publ. Geol. Soc. London.* 30, 273-291.
- FOULGER, G.R., CHRISTIANSEN, R.L., ANDERSON, D.L. 2015. The Yellowstone 'hot spot' track results from migrating Basin Range extension. *The Interdisciplinary Earth: A volume in honor of Don L. Anderson*. Eds. Foulger, G.R., Lustrino, M., King, S.D. GSA Special Paper. American Geophysical Union Special Publication. 71. 215-238.
- FRICK, C., KENT, L.E., 1984. Drift pumice in the Indian and South Atlantic Oceans. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* 87, 19-33
- GASS, I.G., HARRIS, P.G., HOLDGATE, M.W. 1963. Pumice eruption in the área of the South Sandwich Islands. *Geol. Mag.* 100. 321-330.
- GUHIN, S., RAY, P., MARIANO, A.J., RYAN, E.H. 2003. The South Atlantic Current. *Ocean Surface Currents*. <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/southern/south-atlantic.html>. Acessado em 05/11/2019.
- GYORY, J., BAEL, L.M., BISCHOF, B., MARIANO, A.J., RYAN, E.H. 2004. The Agulhas Current. *Ocean Surface Currents*. <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/atlantic/agulhas.html>. Acessado em 05/11/2019.
- HALLIDAY, A. N., LEE, D.C, TOMMASINI, S., DAVIES, G. R., PASLICK C. R., FITTON J. G., JAMES, D. E., 1995. Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichment in the sub-oceanic mantle. *Earth Plant. Sci. Lett.* 133, 379-395.
- HARDS, V.L. 2004. Assessment of volcanic activity in the wake of the seismic episode of 29/30 July 2004 on Tristan da Cunha, South Atlantic Ocean. *British Geological Survey Commissioned Report CR/04/235*, 20 pp
- HARDS, V.L. 2009. The 2004 Eruption of Tristan da Cunha Volcano. *Shima: The International Journal of Research into Island Cultures*. 3. 1. 16-32

- HARRIS, C. 1983. The petrology of lavas and associated plutonic inclusions of Ascension Island. *J. Petrol.* 24, 424–470.
- HARTT, C.F., 1870. *Geology and Physical Geography of Brazil*. Ed. Fields Osgood and Co. Boston.
- HEDBERG, J. D. 1969. A Geological Analysis of the Cameroon Trend. Ph.D. thesis, Princeton University, Princeton, NJ, 188.
- HICKS, A., BARCLAY, J., MARK, D. F., LOUGHLIN, S. 2012. Tristan da Cunha: constraining eruptive behaviour using the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique. *Geology* 40, 723–726.
- HOFMANN, A.W., WHITE, W.M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth planet. Sci. Lett.* 57. 421-436.
- IMSLAND, P., LARSEN, J. G., PRESTVIK, T., SIGMOND, E. M. 1977. The geology and petrology of Bouvetøya, south Atlantic Ocean. *Lithos* 10, 213–234
- IRVINE, T. N., BARAGAR, W. R. A., 1971 A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523-48.
- JANOŮŠEK, V., FARROW, C.M., ERBAN, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6): 1255-1259.
- JEFFERY, A.J., GERTISSER, R. 2018. Peralkaline Felsic Magmatism of the Atlantic Islands. *Front. Earth Sci.* 6:145.
- JICHA B. R., SINGER B. S., VALENTINE M. J. 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of subaerial Ascension Island and a re-evaluation of the temporal progression of basaltic to rhyolitic volcanism. 54, 2581-2596.
- JOKIEL, P.L., COX, E.F., 2003. Drift pumice at Christmas Island and Hawaii: evidence of oceanic dispersal patterns. *Marine Geology.* 202,121-133
- KAR, A., WEAVER, B., DAVIDSON, J., COLUCCI, M. 1998. Origin of differentiated volcanic and plutonic rocks from Ascension Island, South Atlantic Ocean. *J. Petrol.* 39, 1009–1024.
- KAWABATA, H., HANYU TAKESHI, CHANG QING, KIMURA, J.I., NICHOLS, A.R., TATSUMI, Y. 2011. The petrology and geochemistry of St. Helena alkali basalts: evaluation of the oceanic crust-recycling model for HIMU OIB. *J. Petrol.* 52, 791-838.
- LE BAS, M. J., LE MAITRE, R. W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.* 27, 745–750.

- LE MAITRE, R. W. 1962. Petrology of volcanic rocks, Gough Island, South Atlantic. *Geol. Soc. Am. Bull.* 73, 1309–1340.
- LE ROEX, A. P. 1985. Geochemistry, mineralogy, and magmatic evolution of the basaltic and trachytic lavas from Gough Island, South Atlantic. *J. Petrol.* 26, 149–186.
- LE ROEX, A. P., CLIFF, R. A., ADAIR, B. J. I. 1990. Tristan da Cunha, South Atlantic: geochemistry and petrogenesis of a basanite-phonolite lava series. *J. Petrol.* 31, 779–812.
- LEE, D. C., HALLIDAY, A. N., FITTON, G. J., POLI, G. 1994. Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon Line: evidence of the mantle plume origin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 123, 119–138.
- LIOTARD, J. M., DUPUY, C., DOSTAL, J., CORNEN G., 1982. Geochemistry of the volcanic island. Of Annobon, Gulf of Guinea. *Chem. Geol.* 35, 115-128
- LOPES, R. P. 2002. O vulcanismo do Arquipélago de Fernando de Noronha, PE:Química Mineral e Geoquímica. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- LOPES, R. P., ULBRICH, M. N. C. 2015. Geochemistry of the alkaline volcanic-subvolcanic rocks of the Fernando de Noronha archipelago, Southern Atlantic Ocean. *Braz. J. Geol.* 45, 307–333.
- LOPES, R. P., ULBRICH, M. N. C., ULBRICH, H. 2014. The subvolcanic rocks of the Fernando de Noronha archipelago, southern Atlantic Ocean: mineral chemistry. *Central Eur. J. Geosci.* 6, 422–456. doi: 10.2478/s13533-012-0195-7
- MANVILLE, V., WHITE, J.D.L., HOUGHTON, B.F., WILSON, C.J.N., 1998. The saturation behaviour of pumice and some sedimentological implications. *Sediment. Geol.* 119 (1–2), 5–16.
- MARQUES, L.S., ULBRICH, M.N.C., RUBERTI, E., TASSINARI, C.G. 1999. Petrology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Trindade and Martim Vaz volcanic rocks (South Atlantic Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 93, 191-216.
- MARZOLI, A., PECCIRILLO, E. M., RENNE, P. R., BELLINI, G., IACUMIN, M., NYOBE, J. B., 2000. The Cameroon Volcanic Line revisited: petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. *J. Petrol.* 41, 87–109.
- MAUND, J. G., REX, D. C., LE ROEX, A. P., REID, D. L. 1988. Volcanism on Gough Island: a revised stratigraphy. *Geol. Mag.* 125, 175–181.
- MCDONOUGH, W.F., SUN, S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.

- MCPHIE, J., DOYLE, M., ALLEN, R., 1993. Volcanic textures – a guide to interpretation of textures in volcanic rocks. Tasmania, Tasmanian Gov. Printing Office. 198p.
- MEIBOM, A., ANDERSON, D.L. 2003. Statistical upper mantle assemblage. *Earth planet Sci. Lett.* 217. 123-139
- MORGAN, W.J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature.* 230. 42-43.
- MOROSHKIN, K.V., Bunov, V.A., Bulatov, R.P. 1970. Water circulation in the eastern South Atlantic Ocean. *Oceanology*, 10, 27-34
- NAKAMURA, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 38(5), 757-775.
- NIELSON, D. L., SIBBETT, B. S. 1996. Geology of ascension Island, South Atlantic Ocean. *Geothermics* 25, 427–448.
- O'MONGAIN A., OTTEMOLLER L., BAPTIE B., GALLOWAY D., BOOTH D. (2007) Seismic activity associated with a probable submarine Timescales of fractionation to produce the 2004 Tristan phonolite 4377 eruption near Tristan Da Cunha, July 2004–July 2006. *Seismol. Res. Lett.* 78, 375–382.
- PEARCE, J.A., NORRY, M.J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.* 69, 33-47.
- PERLINGEIRO, G., VASCONCELOS, P. M., KNESEL, K. M., THIEDE, D. S., CORDANI, U. G. 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Fernando de Noronha Archipelago and implications for the origin of alkaline volcanism in the NE Brazil. *J. Volcanol. Geother. Res.* 249, 140–154.
- PETERSON, R.G., 1992: The boundary currents in the western Argentine Basin. *Deep-Sea Research*, 39, 623-644
- PETERSON, R.G., STRAMMA, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanog.* Vol. 26, pp. 1-73
- PIRES, G. L. C., BONGIOLO, E. M., GERALDES, M. C., RENAC, C., SANTOS, A. C., JOURDAN, F. 2016. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and revised $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ data from nephelinitic-phonolitic volcanic successions of the Trindade Island (South Atlantic Ocean). *J. Volcanol. Geother. Res.* 327, 531–538.
- PIRES, G. L. C., BONGIOLO, E. M. 2016. The nephelinitic-phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. *J. South Am. Earth Sci.* 72, 49–62.

- PREECE, K., MARK, D. F., BARCLAY, J., COHEN, B. E., CHAMBERLAIN, K. J., JOWITT, C. 2018. Bridging the gap: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of volcanic eruptions from the 'Age of Discovery'. *Geology*.
- PRESTVIK, T. 1982. Trace element geochemistry of volcanic rocks from Bouvetøya, South Atlantic. *Antarctic Geoscience*, ed. C. Craddock (Madison, WI: The University of Wisconsin press), 771–774.
- PRESTVIK, T., GOLDBERG, S., GOLES, G. 1999. Petrogenesis of the volcanic suite of Bouvetøya (Bouvet Island), South Atlantic. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 79, 205–218.
- REAGAN, M.K., TURNER, S., LEGG, M., SIMS, K.W.W., HARDS, V.L. 2008. ^{238}U - and ^{232}Th -decay series constraints on the timescales of crystal fractionation to produce the phonolite erupted in 2004 near Tristan da Cunha, South Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 72, 4367-4378.
- RISSO, C., SCASSO, R.A., APARICIO, A., 2002. Presence of large pumice blocks on Tierra del Fuego and South Shetland Islands shorelines, from 1962 South Sandwich Islands eruption. *Mar. Geol.* 186, 413-422.
- ROLLINSON, H. 1995. *Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific and Technical Press. 26.
- SACHS, L. 1984. *Applied statistics: a handbook of techniques*. 2nd edition. Springer-Verlag. New York.
- SIGURDSSON, H., MCNUTT, S., RYMER, H., HOUGHTON, B., STIX, J. 1999. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 1417 p.
- SMITH, R., DESFLOTS, M., WHITE, S., MARIANO, A.J., RYAN, E.H. 2004. The Antarctic CP. Current. Ocean Surface Currents. <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/southern/antarctic-cp.html>. Acessado em 05/11/2019.
- SUH, C. E., SPARKS, R. S. J., FITTON, J. G., AYONGHE, S. N., ANNEN, C., NANA, R. 2003. The 1999 and 2000 eruptions of Mount Cameroon: eruption behaviour and petrochemistry of lava. *Bull. Volcanol.* 65, 267–283.
- SUTHERLAND, F.L., OLSEN, A.M. 1968. The persistence of drift pumice from the 1962 South Sandwich Islands eruption, in *Southern Australasian Waters*. Pap. and proc. Royal Soc. of Tasmania. 102. 1-5.
- STEWART R., O'MONGAIN A., OTTEMOELLER L., BAPTIE B., BOOTH D., HARDS V. 2005 Detection of an underwater eruption near Tristan Da Cunha using the IMS network. *Geophys. Res. Abstr.* 7, EGU05-A-02392.
- STRAMMA, L., PETERSON, R.G., 1989: Geostrophic transport in the Benguela Current region. *Journal of Physical Oceanography*, 19, 1440-1448.

- ULBRICH, M. N. C. 1993. Petrography of alkaline volcanic-subvolcanic rocks from the Brazilian Fernando de Noronha archipelago, southern Atlantic Ocean. *Bull. Institut. Geosci. Univ. São Paulo* 24, 77–94.
- VAN SEBILLE, E., ENGLAND, M.H., FROYLAND, G. 2012. Origin, dynamics and Evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*. 7. 6pp.
- VERWOERD, W. J., ERLANK, A. J., KABLE, E. J. D. 1976. Geology and geochemistry of Bouvet Island. *Andean and Antarctic Volcanology Problems*, ed. O. Gonzales Ferran (Naples: IAVCEI), 203–237.
- WEAVER, B.L. 1987. Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan da Cunha. *Geological Society, London, Special Publications*. 30. 253-267.
- WEAVER, B. L. 1990. Geochemistry of highly-undersaturated ocean island basalt suites from the Southern Atlantic Ocean: Fernando de Noronha and Trindade islands. *Contrib. Mineral. Petrol.* 105, 502–515.
- WEAVER, B., KAR, A., DAVIDSON, J., COLLUCCI, M. 1996. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ascension Island, South Atlantic Ocean. *Geothermics* 25, 449–470.
- WEDEPOHL, P.M., LURJEHARMS, J.R.E., MEEUWIS, J.M., 2000. Surface drift in the south-east Atlantic Ocean. *South African Journal of Marine Science*, 22, 71-79.
- WILSON, M. 2007. *Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach*. Springer. 466 p.
- WITHAM, A.G., SPARKS, R.S.J., 1986. Pumice. *Bull. Volcanol.* 48 (4) 209-223.
- YAMGOUOT, F.N., DÉRUELLE, B., MBOWOU, I.B.G., NGOUNOUNO, I., DEMAIFFE, D., 2016. Geochemistry of the volcanic rocks from Bioko Island, (“Cameroon Hot Line”): evidence for plume-lithosphere interaction. *Geoscience Frontiers*. 7, 743-757.
- YAXLEY, G.M. 2000. Experimental study of the phase and melting relations of homogeneous basalt + peridotite mixtures and implication for the petrogenesis of flood basalts. *Cont. Min. Pet.* 139. 326-338.