Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Daniel Adelino da Silva

Geoquímica e geocronologia (U-Pb e Lu-Hf) das intrusões alcalinas félsicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá: Implicações sobre as fontes do magmatismo alcalino no Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2019

Daniel Adelino da Silva

Geoquímica e geocronologia (U-Pb e Lu-Hf) das intrusões alcalinas félsicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá: Implicações sobre as fontes do magmatismo alcalino no Estado do Rio de Janeiro

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Cesar Geraldes

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

S586g Silva, Daniel Adelino da.
Geoquímica e geocronologia (U-Pb e Lu-Hf) das intrusões alcalinas félsicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá: implicações sobre as fontes do magmatismo alcalino no Estado do Rio de Janeiro / Daniel Adelino da Silva. – 2019.
184 f. : il.

Orientador: Mauro Cesar Geraldes.
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Petrologia – Rio de Janeiro (RJ) – Teses. 2. Geoquímica – Tanguá (RJ) – Teses. 3. Geoquímica – Tinguá (RJ) – Teses. 4. Geoquímica – Rio Bonito (RJ) – Teses. 5. Geocronologia – Rio de Janeiro (RJ) – Teses. 6. Rochas - Formação mineral – Teses. I. Geraldes, Mauro Cesar. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 552.11(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7: 5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Daniel Adelino da Silva

Geoquímica e geocronologia (U-Pb e Lu-Hf) das intrusões alcalinas félsicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá: Implicações sobre as fontes do magmatismo alcalino no Estado do Rio de Janeiro

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Aprovada em 29 de março de 2019.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Cesar Geraldes

Banca Examinadora:

_____

Prof.ª Drª. Eliane Guedes

Museu Nacional – Universidade Federal do Rio de Janeiro

_____

Prof. Dr. Julio Cesar Mendes

Departamento de Geologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro

_____

Dr. Peter Szatmari

CENPES – Petróleo Brasileiro S.A.

_____

Prof.ª Drª. Thais Vargas

Faculdade de Geologia - UERJ

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

.

Dedico este trabalho a meus familiares, professores e amigos que são os pilares da minha formação como indivíduo.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus ternos agradecimentos a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram na elaboração desse trabalho, bem como, tornaram essa jornada de doutorando mais agradável. Agradeço antes de tudo a oportunidade de frequentar a UERJ que é um centro de excelência apesar dos pesares.

Ao meu orientador Mauro Cesar Geraldes por ter me recebido de braços abertos e me conduzido pelo caminho da pós-graduação.

Ao Professor Akihisa Motoki que fez parte da minha vida acadêmica desde a graduação sendo o primeiro professor com quem estagiei até o início deste doutorado que teria a orientação dele caso não tivesse deixado esse plano.

Aos queridos amigos Wilmer Enrique Giraldo Ramirez, Michael McMaster, Bruno Lopes Gomes e Vitalino Elizeu Ferreira do Carmo pelos ótimos momentos de discussões saudáveis boas risadas e conselhos necessários.

Ao Professor Anderson Costa dos Santos a Professora Mônica Heilbron e o geólogo Carlos Eduardo Miranda Mota pelo apoio.

Aos caros Teodoro, Gabriel, Juliana e Daniele por toda ajuda nas etapas de campo e também no processamento das amostras, etapas importantes do processo.

Ao geólogo Arthur Moreira da Silva e a todos os colegas da pós-graduação pelos anos de convívio, troca de informações e momentos de descontração.

Ao geólogo Marcos Silva Machado e ao geógrafo Felipe Rodrigues Waldherr que foram super solícitos e deram grande ajuda na confecção de mapas.

À geóloga Thais Monteiro pela atenção e disponibilidade para me ajudar nos momentos finais antes da entrega do texto para a banca.

Aos técnicos do LGPA Gabriela, Núbia, Luís e Thiago.

Às secretárias da pós-graduação Juçara e Mariani.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela bolsa de auxilio que é tão importante a quem faz pesquisa neste país.

Aos técnicos do MultiLab laboratório multi usuário de meio ambiente e materiais da UERJ Raimundo e Marco.

Ao Professor Cristiano de Carvalho Lana e a Técnica Ana Ramalho Alkmin do Laboratório de Geoquímica Isotópica da UFOP.

Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar.

Chico Science

RESUMO

Silva, Daniel Adelino da. *Geoquímica e geocronologia (U-Pb e Lu-Hf) das intrusões alcalinas félsicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá*: implicações sobre as fontes do magmatismo alcalino no Estado do Rio de Janeiro - RJ. 2019. 184f. Tese (Doutorado em Geociências) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Esta tese investiga as intrusões alcalinas cretáceas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá, as quatro integram a Província Alcalina do Sudeste Brasileiro ou Lineamento Magmático Poços de Caldas Cabo Frio. Os corpos foram alvo de análises petrográficas, geoquímicas, geocronológicas (U-Pb) e isotópicas (Lu-Hf). As intrusões de Tanguá, Rio Bonito e Tinguá formam basicamente corpos nefelina sieníticos cortados por diques de fonolito nos quais rochas máficas e intermediárias raramente afloram. Em contrapartida, a intrusão de Soarinho é formada por monzonito, álcali feldspato sienito, álcali feldspato traquito e quartzo sienito. Quimicamente Tanguá, Rio Bonito e Tinguá são predominantemente metaluminosos e plotam nos campos ultra potássico e potássico, por outro lado, Soarinho é predominantemente peraluminoso e plota no campo potássico. Os dados geoquímicos indicam uma evolução por AFC para as intrusões de Tanguá e Rio Bonito. Para a intrusão de Soarinho o modelo mais provável é o de mistura de magma numa proporção entre 36 a 44% de monzonito com 56 a 64% de álcali feldspato sienito dando origem a um híbrido de composição quartzo sienítica. As idades U-Pb obtidas em zircão via *Laser Ablation* sugerem que os nefelina sienitos localizados na borda das intrusões de Tanguá e Rio Bonito são contemporâneos (65 Ma) entre si e também com as amostras datadas de Tinguá (66 Ma) dentro do erro. Por outro lado, os dados geocronológicos mostram que a intrusão de Soarinho é mais nova (58 Ma) que as demais e as idades de três amostras (monzonito, álcali feldspato sienito e quartzo sienito) são indistinguíveis dentro do erro. Além disso, o modelo de mistura de magma sugere que Soarinho seja formado por pelo menos três pulsos magmáticos: o primeiro teria gerado monzonito e os dois subsequentes gerariam álcali feldspato sienito e quartzo sienito. Os valores de εHf de todas as amostras de todas as intrusões analisadas nessa tese são negativos com média de -8 para Soarinho, -11 para Tanguá, -14 para Rio Bonito e -12 para Tinguá. Os dados isotópicos e geoquímicos apontam para fonte mantélica enriquecida já com um épsilon negativo, porém, não pode ser descartada uma importante participação de crosta mais antiga na formação das rochas alcalinas dessa Província.

Palavras chave: Rochas alcalinas félsicas. Geoquímica. Idades U-Pb. Isótopos de Hf. Contribuição crustal.

ABSTRACT

Silva, Daniel Adelino da. *Geochemistry and geochronology (U-Pb & Lu-Hf) of the Soarinho, Tanguá, Rio Bonito and Tinguá felsic alkaline intrusions:* implications for the sources of the alkaline magmatism in the Rio de Janeiro State - RJ. 2019. 184f. Tese (Doutorado em Geociências) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

This thesis investigates the Cretaceous Soarinho, Tanguá, Rio Bonito, and Tinguá alkaline intrusions which form part of the South-eastern Brazilian Alkaline Province or Poços de Caldas-Cabo Frio Magmatic Lineament. Petrographic, geochemical, geochronological (U-Pb), and isotopic (Lu-Hf) studies were undertaken of the intrusive bodies. The Tanguá, Rio Bonito and Tinguá intrusions are composed of mostly nepheline syenite cut by phonolite dykes, with isolated outcrops of mafic and intermediate rocks. In contrast, the Soarinho intrusion consists of monzonite, alkali feldspar syenite, alkali feldspar trachyte and quartz syenite. Geochemically Tanguá, Rio Bonito and Tinguá are mainly metaluminous and plot within the ultra potassic and potassic fields, while Soarinho is mainly peraluminous and potassic. The geochemical data indicate an evolution by AFC for the Tanguá and Rio Bonito intrusions. However, magma mixing is suggested for the Soarinho intrusion with mixing between a monzonite magma (36% to 44%) and an alkali feldspar syenite magma (56% to 64%) resulting in an overall quartz syenite composition. Zircon U-Pb Laser Ablation ages show that the nepheline syenites of both the Tanguá and Rio Bonito intrusions are contemporaneous (65 Ma), with a similar age (66 Ma - within error) obtained for nepheline syenites from Tinguá. On the other hand, dating of Soarinho show that it is the youngest (58 Ma) of the studied intrusions, with the ages obtained from the monzonite, alkali feldspar syenite and quartz syenite, indistinguishable (within error). The magma mixing model suggest that at least three magmatic pulses were responsible for the formation of the Soarinho intrusion: the first pulse related to the monzonite and the two subsequent pulses leading to the emplacement of the alkali feldspar syenite and quartz syenite. The εHf values of all the samples from intrusions are negative with average values of -8 for Soarinho, -11 for Tanguá, -14 for Rio Bonito and -12 for Tinguá. This isotopic signature and the geochemistry data of the alkaline rocks point to an enriched mantle source with a negative εHf value. However, assimilation by an older continental crust source can not be ruled out for the formation of the alkaline rocks of this Province.

Keywords: Felsic alkaline rocks. Geochemistry. U-Pb ages. Hf Isotopes. Crustal assimilation.

RESUMEN

Silva, Daniel Adelino da. *Geoquímica y geocronología (U-Pb y Lu-Hf) de las intrusiones alcalinas felsicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito y Tinguá:* implicaciones sobre las fuentes del magmatismo alcalino en el Estado de Río de Janeiro - RJ. 2019. 184f. Tese (Doutorado em Geociências) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Esta tesis investiga las intrusiones alcalinas cretácicas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito y Tinguá, las cuatro integran la Provincia Alcalina del Sudeste brasileño o Lineamiento Magmático Poços de Caldas-Cabo Frio. Los cuerpos fueron objeto de análisis petrográficos, geoquímicos, geocronológicos (U-Pb) e isotópicos (Lu-Hf). Las intrusiones de Tanguá, Rio Bonito y Tinguá forman básicamente cuerpos nefelino-sieniticas cortados por diques de fonolita en los cuales rocas máficas e intermedias raramente afloran. Por otro lado, la intrusión de Soarinho es formada por monzonita, sienita de feldespato potásico, traquita de feldespato potásico y cuarzo sienita. Químicamente Tanguá, Rio Bonito y Tinguá son predominantemente metaluminosos y grafican en los campos ultra potásico y potásico, por otro lado, Soarinho es predominantemente peraluminoso y grafica en el campo potásico. Los datos geoquímicos indican una evolución por AFC para las intrusiones de Tanguá y Rio Bonito. Para la intrusión de Soarinho el modelo más probable es el de mezcla de magmas en una proporción entre 36 a 44% de monzonita con 56 a 64% de sienita de feldespato potásico, dando origen a un hibrido de composición cuarzo sienítica. Las edades U-Pb obtenidas en zircón por *Laser Ablation* sugieren que las sienitas nefelinicas ubicadas en los bordes de las intrusiones de Tanguá y Rio Bonito son contemporáneas (65 Ma) entre sí y también con las muestras datadas de Tinguá (66 Ma) dentro del error. Por otro lado, los datos geocronológicos muestran que la intrusión de Soarinho es más joven (58 Ma) que las demás y las edades de tres muestras (monzonita, sienita de feldespato potásico y cuarzo sienita) son indistinguibles dentro del error. Además, el modelo de mezcla de magmas sugiere que Soarinho es formado por al menos tres pulsos magmáticos: el primero habría generado monzonita y los dos subsiguientes generarían sienita de feldespato potásico y cuarzo sienita. Los valores de εHf de todas las muestras de todas las intrusiones analizadas en esta tesis son negativos con media de -8 para Soarinho, -11 para Tanguá, -14 para Rio Bonito y -12 para Tinguá. Los datos isotópicos y geoquímicos apuntan a una fuente mantelica enriquecida con uno épsilon negativo, sin embargo, no se puede descartar una importante participación de corteza más antigua en la formación de las rocas alcalinas de esta Provincia.

Palabras clave: Rocas alcalinas félsicas. Geoquímica. Edades U-Pb. Isótopos de Hf. Contribución cortical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alinhamento magmático Poços de Caldas Cabo Frio…..... 19
Figura 2 - Equipamentos usados na etapa de separação de zircões..... 33
Figura 3 - Mapa geológico da intrusão de Soarinho..... 39
Figura 4 - Fotos em amostra de mão e fotomicrografias do quartzo sienito..... 41
Figura 5 - Fotos em amostra de mão e fotomicrografias do monzonito..... 43
Figura 6 - Fotos em amostra de mão e fotomicrografias do álcali feldspato sienito..... 45
Figura 7 - Fotos em amostra de mão e fotomicrografias do álcali feldspato traquito..... 47
Figura 8 - Diagramas de classificação química TAS (A) e R1-R2 (B) com 16 amostras analisadas da intrusão de Soarinho..... 50
Figura 9 - Diagrama de saturação álcali alumina com 16 amostras analisadas da intrusão de Soarinho..... 51
Figura 10 - Diagrama discriminante entre séries ultra potássica, potássica e sódica com 16 amostras analisadas da intrusão de Soarinho.. 52
Figura 11 - Diagramas de variação para elementos maiores com 16 amostras da intrusão alcalina de Soarinho..... 55
Figura 12 - Diagramas de variação para elementos traço com 16 amostras da intrusão de Soarinho..... 56
Figura 13 - Diagrama de elementos terras raras normalizado ao condrito aplicado às amostras da intrusão de Soarinho..... 58
Figura 14 - Diagrama multi elementar normalizado ao manto primitivo aplicado às amostras da intrusão de Soarinho..... 59
Figura 15 - Diagrama AI vs FSSI com 16 amostras da intrusão alcalina de Soarinho..... 60
Figura 16 - Diagrama SSI vs (Na+K)/Al (mol) com 16 amostras da intrusão de Soarinho..... 61
Figura 17 - Concórdia construída a partir de 5 pontos selecionados da amostra SOA-01 (quartzo sienito)..... 63

Figura 18 - Concórdia construída a partir de 12 pontos selecionados da amostra SOA-02 (monzonito)..... 65
Figura 19 - Concórdia construída a partir dos 14 pontos selecionados da amostra SOA-05..... 67
Figura 20 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra SOA-01 e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra SOA-01..... 68
Figura 21 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra SOA-02 e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra SOA-02..... 70
Figura 22 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra SOA-05 e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra SOA-05..... 72
Figura 23 - Mapa geológico da intrusão de Tanguá..... 75
Figura 24 - Aspectos macroscópicos e microscópicos do nefelina sienito da intrusão de Tanguá..... 77
Figura 25 - Diagramas de classificação química TAS (A) e R1-R2 (B) com 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 79
Figura 26 - Diagrama de saturação álcali alumina com 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 80
Figura 27 - Diagrama discriminante entre séries ultrapotássica, potássica e sódica com 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 81
Figura 28 - Diagramas de variação D.I. vs. Elementos maiores para 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 83
Figura 29 - Diagramas de variação D.I. vs. Elementos traço para 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 84
Figura 30 - Diagrama AI vs. FSSI com 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 85
Figura 31 - Diagrama SSI vs (Na+K)/Al (mol) com 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 86
Figura 32 - Concórdia construída a partir de 22 pontos selecionados da amostra TAG-02 (nefelina sienito)..... 87
Figura 33 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra TAG-02 e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra TAG-02..... 89
Figura 34 - Mapa geológico da intrusão de Rio Bonito..... 92
Figura 35 - Aspectos macroscópicos e microscópicos do nefelina sienito da

intrusão de Rio Bonito..... 94
Figura 36 - Aspectos macroscópicos e microscópicos da amostra RIB-09 (mela-nefelina sienito) da intrusão de Rio Bonito..... 96
Figura 37 - Aspectos macroscópicos e microscópicos da amostra RIB-02A (mela-nefelina sienito) da intrusão de Rio Bonito..... 97
Figura 38 - Diagramas de classificação química TAS (A) e R1-R2 (B) com 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 101
Figura 39 - Diagrama de saturação álcali alumina com 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 102
Figura 40 - Diagrama discriminante entre séries ultrapotássica, potássica e sódica com 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 103
Figura 41 - Diagramas de variação D.I. vs. Elementos maiores para 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 106
Figura 42 - Diagramas de variação D.I. vs. Elementos traço para 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 107
Figura 43 - Diagrama de elementos terras raras normalizado ao condrito aplicado às amostras da intrusão de Rio Bonito..... 109
Figura 44 - Diagrama multi elementar normalizado ao manto primitivo aplicado às amostras da intrusão de Rio Bonito..... 110
Figura 45 - Diagrama AI vs FSSI com 23 amostras de Rio Bonito..... 111
Figura 46 - Diagrama SSI vs (Na+K)/Al (mol) com 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 112
Figura 47 - Concórdia construída a partir de 13 pontos selecionados da amostra RB-01 (nefelina sienito)..... 113
Figura 48 - Concórdia construída a partir de 27 pontos selecionados da amostra RB-02 (nefelina sienito)..... 115
Figura 49 - (A) Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra RB-01. (B) Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra RB-01..... 117
Figura 50 - (A) Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra RB-01. (B) Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra RB-01..... 119
Figura 51 - Mapa da intrusão alcalina de Tinguá..... 122
Figura 52 - Fotos em amostra de mão e em lâmina delgada do nefelina

sienito da intrusão de Tinguá..... 124
Figura 53 - Fotos em amostra de mão e em lâmina delgada do fonolito da intrusão de Tinguá..... 125
Figura 54 - Diagramas de classificação química TAS (A) e R1-R2 (B) com 4 amostras da intrusão de Tinguá..... 128
Figura 55 - Diagrama de saturação álcali alumina com 4 amostras da intrusão de Tinguá..... 129
Figura 56 - Diagrama binário Na_2O vs K_2O usado em 4 amostras da intrusão de Tinguá..... 130
Figura 57 - Diagrama de elementos terras raras normalizado ao condrito aplicado às amostras da intrusão alcalina de Tinguá..... 132
Figura 58 - Diagrama multi elementar normalizado ao manto primitivo aplicado às amostras da intrusão alcalina de Tinguá..... 133
Figura 59 - Diagrama AI vs FSSI com 4 amostras da intrusão de Tinguá..... 134
Figura 60 - Diagrama SSI vs (Na+K)/Al (mol) com 4 amostras da intrusão de Tinguá..... 135
Figura 61 - Concórdia construída a partir dos 10 pontos selecionados da amostra TIG-01A..... 136
Figura 62 - Concórdia construída a partir dos 23 pontos selecionados da amostra TIG-02A..... 138
Figura 63 - Concórdia construída a partir dos 10 pontos selecionados da amostra TIG-03..... 140
Figura 64 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra TIG-01A e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra TIG-01A..... 142
Figura 65 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra TIG-02A e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra TIG-02A..... 144
Figura 66 - Diagrama $^{176}Hf/^{177}Hf$ vs. Idade da amostra TIG-03 e Diagrama ƐHf vs. Idade da amostra TIG-03..... 146
Figura 67 - Diagramas multi elementares normalizados ao manto primitivo mostrando o ajuste entre um híbrido real (quartzo sienito) e um híbrido modelado..... 152
Figura 68 - Compilação de idades das intrusões do Lineamento Poços de

Caldas Cabo Frio..... 156
Figura 69 - Litotipos datados do Lineamento Cabo Frio..... 157
Figura 70 - Comparativo das razões iniciais $^{176}Lu/^{177}Hf$ das 9 amostras analisadas..... 159
Figura 71 - Comparativo dos valores de εHf das 9 amostras analisadas..... 160
Figura 72 - Diagrama εHf vs $^{176}Lu/^{177}Hf$ com 177 dados das intrusões de Soarinho, Rio Bonito, Tanguá e Tinguá..... 161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Litogeoquímica de rocha total para 16 amostras da intrusão de Soarinho..... 49
Tabela 2 - Norma CIPW de 16 amostras da intrusão de Soarinho..... 53
Tabela 3 - Dados analíticos U-Pb da amostra SOA-01 (quartzo sienito)..... 62
Tabela 4 - Dados analíticos U-Pb da amostra SOA-02 (Monzonito)..... 64
Tabela 5 - Dados analíticos U-Pb da amostra SOA-05 (álcali feldspato sienito)..... 66
Tabela 6 - Dados de 18 análises Lu-Hf da amostra SOA-01..... 69
Tabela 7 - Dados de 18 análises Lu-Hf da amostra SOA-02..... 71
Tabela 8 - Dados de 17 análises Lu-Hf da amostra SOA-05..... 73
Tabela 9 - Norma CIPW de 16 amostras da intrusão de Tanguá..... 82
Tabela 10 - Dados analíticos U-Pb da amostra TAG-02 (nefelina sienito)... 88
Tabela 11 - Dados de 20 análises Lu-Hf da amostra TAG-02..... 90
Tabela 12 - Litogeoquímica para 23 amostras da intrusão de Rio Bonito.... 99
Tabela 13 - Norma CIPW de 23 amostras da intrusão de Rio Bonito..... 104
Tabela 14 - Dados analíticos U-Pb da amostra RB-01 (nefelina sienito)..... 114
Tabela 15 - Dados analíticos U-Pb da amostra RB-02 (nefelina sienito)..... 116
Tabela 16 - Dados de 24 análises Lu-Hf da amostra RB-01..... 118
Tabela 17 - Dados de 20 análises Lu-Hf da amostra RB-02..... 120
Tabela 18 - Litogeoquímica preliminar da intrusão de Tinguá..... 127
Tabela 19 - Norma CIPW de 4 amostras da intrusão alcalina de Tinguá..... 131
Tabela 20 - Dados analíticos U-Pb da amostra TIG 01A..... 137
Tabela 21 - Dados analíticos U-Pb da amostra TIG 02A..... 139
Tabela 22 - Dados analíticos U-Pb da amostra TIG 03..... 141
Tabela 23 - Dados de 20 análises Lu-Hf da amostra TIG-01A..... 143
Tabela 24 - Dados de 20 análises Lu-Hf da amostra TIG-02A..... 145
Tabela 25 - Dados de 20 análises Lu-Hf da amostra TIG-03..... 147

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
1	**OBJETIVOS**	21
1.1	**Objetivos Gerais**	21
1.2	**Objetivos Específicos**	21
2	**CONTEXTO GEOTECTÔNICO**	22
2.1	**Magmatismo Alcalino do Sudeste Brasileiro**	22
2.2	**Modelos Geodinâmicos para o Lineamento Cabo Frio**	22
2.3	**Origem dos magmas alcalinos**	24
2.4	**Tipos de fontes mantélicas**	26
2.5	**Plumas e *Hot Spots***	27
3	**METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS**	29
3.1	**Pesquisa Bibliográfica**	29
3.2	**Geologia de Campo**	29
3.3	**Processamento de amostras**	29
3.4	**Química de rocha total**	30
3.5	**Separação de zircões**	31
3.6	**O método U-Pb**	34
3.7	**O método Lu-Hf**	35
4	**RESULTADOS**	38
4.1	**Intrusão Alcalina de Soarinho**	38
4.1.1	Petrografia	40
4.1.1.1	Quartzo sienito	40
4.1.1.2	Monzonito	42
4.1.1.3	Álcali feldspato sienito	44
4.1.1.4	Álcali feldspato traquito	46
4.1.2	Litogeoquímica	48
4.1.2.1	Classificação química	48
4.1.2.2	Norma CIPW	53
4.1.2.3	Diagramas de variação	54
4.1.2.4	Elementos terras raras	57

4.1.2.5 Diagrama multi elementar..... 58
4.1.2.6 Diagrama AI vs FSSI (Frost e Frost, 2008)..... 59
4.1.2.7 Diagrama SSI vs (N+K)/Al (Motoki *et al*, 2010)..... 60
4.1.3 Datação U-Pb (LA-ICP-MS)..... 61
3.1.4 Dados Lu-Hf..... 67
4.2 **Intrusão Alcalina de Tanguá**..... 74
4.2.1 Petrografia..... 76
4.2.1.1 Nefelina sienito..... 76
4.2.2 Litogeoquímica..... 78
4.2.2.1 Classificação química..... 78
4.2.2.2 Norma CIPW..... 81
4.2.2.3 Diagramas de variação..... 82
4.2.2.4 Diagrama AI vs FSSI (Frost e Frost, 2008)..... 84
4.2.2.5 Diagrama SSI vs (N+K)/Al (Motoki *et al*, 2010)..... 85
4.2.3 Datação U-Pb (LA-ICP-MS)..... 86
4.2.4 Dados Lu-Hf..... 89
4.3 **Intrusão Alcalina de Rio Bonito**..... 91
4.3.1 Petrografia..... 93
4.3.1.1 Nefelina sienito..... 93
4.3.1.2 Mela-nefelina sienito..... 95
4.3.2 Litogeoquímica..... 98
4.3.2.1 Classificação química..... 98
4.3.2.2 Norma CIPW..... 103
4.3.2.3 Diagramas de variação..... 105
4.3.2.4 Elementos terras raras..... 108
4.3.2.5 Diagrama multi elementar..... 109
4.3.2.6 Diagrama AI vs FSSI (Frost e Frost, 2008)..... 110
4.3.2.7 Diagrama SSI vs (N+K)/Al (Motoki *et al*, 2010)..... 111
4.3.3 Datação U-Pb (LA-ICP-MS)..... 112
4.3.4 Dados Lu-Hf..... 117
4.4 **Intrusão Alcalina de Tinguá**..... 121
4.4.1 Petrografia..... 123
4.4.1.1 Nefelina sienito..... 123

4.4.1.2 Fonolito..... 125
4.4.2 Litogeoquímica Preliminar..... 126
4.4.2.1 Classificação química..... 126
4.4.2.2 Norma CIPW..... 130
4.4.2.3 Elementos terras raras..... 131
4.4.2.4 Diagrama multi elementar..... 132
4.4.2.5 Diagrama AI vs FSSI (Frost e Frost, 2008)..... 133
4.4.2.6 Diagrama SSI vs (N+K)/Al (Motoki *et al*, 2010)..... 134
4.4.3 Datação U-Pb (LA-ICP-MS)..... 135
4.4.4 Dados Lu-Hf..... 142
5 **DISCUSSÕES**..... 148
CONCLUSÕES..... 163
REFERÊNCIAS..... 166
ANEXO A - Litogeoquímica de rocha total para 16 amostras da intrusão alcalina de Tanguá extraídos de Motoki *et al* 2010 177
ANEXO B - Litogeoquímica de rocha total para amostras de ortognaisses do Complexo Região dos Lagos..... 178
ANEXO C - Litogeoquímica de rocha total para amostras do granito Silva Jardim..... 180
ANEXO D - Litogeoquímica de rocha total para amostras de ortognaisses do Complexo Rio Negro..... 181
ANEXO E - Litogeoquímica de rocha total para amostras do granito Pedra Branca 183

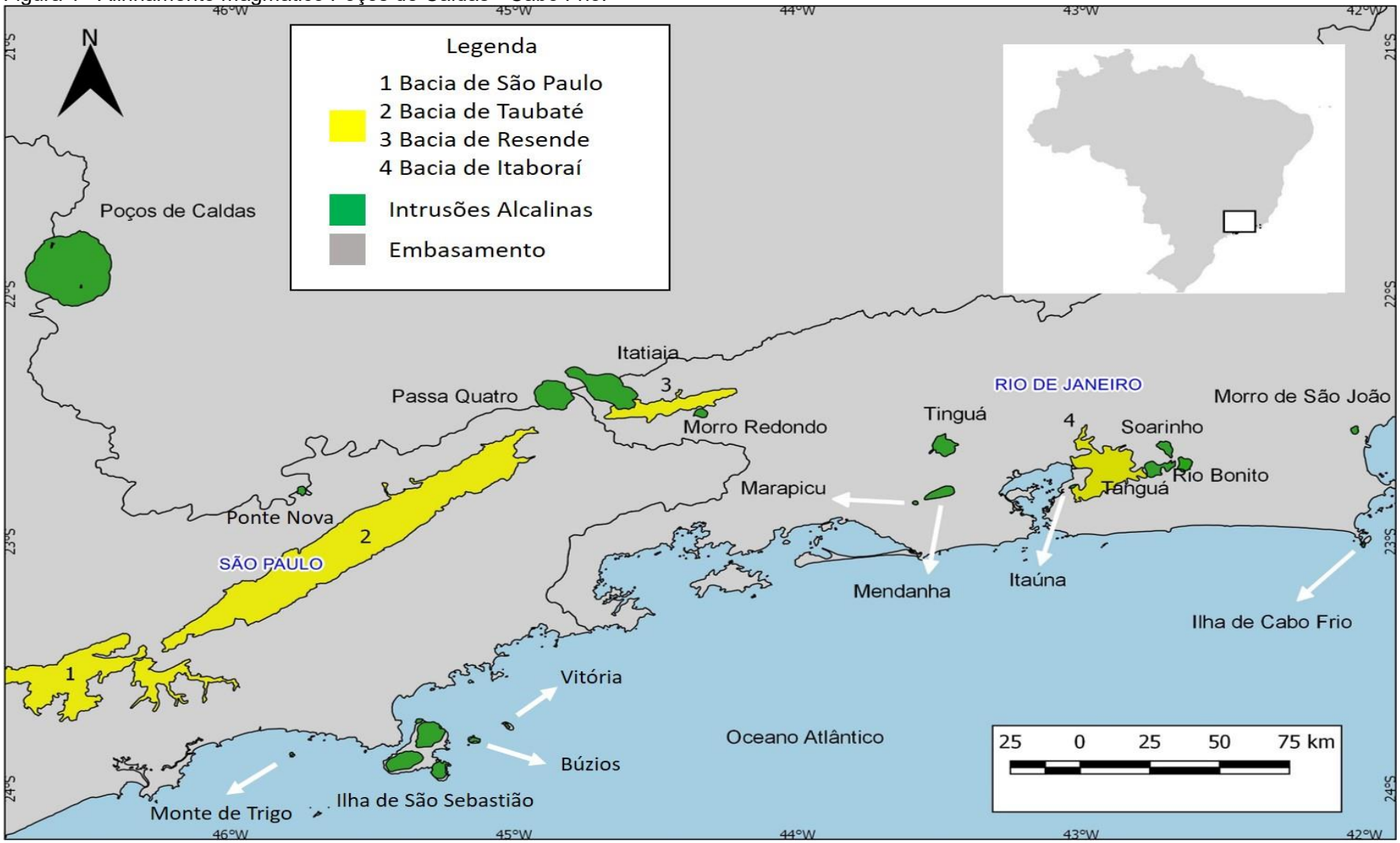
INTRODUÇÃO

O Estado do Rio de Janeiro está localizado em uma região predominantemente formada por rochas do Pré-Cambriano, sobressaindo-se migmatitos e gnaisses de diversos tipos, charnokitos e granitos, caracterizados por uma complexa estruturação geológica. Restritamente ocorrem rochas alcalinas provenientes de um magmatismo Cretáceo-Terciário, depósitos de pequenas bacias terciarias e faixas contínuas correspondentes ao Grupo Barreiras e aos depósitos quaternários de restingas fluviais (Fonseca, 1998).

As suítes alcalinas do sudeste brasileiro ocorrem ao longo de dois grandes lineamentos magmáticos (Figura 1), de direção NW-SE (Lineamento Poços de Caldas-Cabo Frio) e NE-SW (Litoral do Sudeste), com idade Cretácea-Terciária na Plataforma Sul-americana. A idade Cretácea é sugerida pela linearidade das intrusões com outros corpos pertencentes ao lineamento Poços de Caldas-Cabo Frio, sendo que as idades obtidas pelos métodos K-Ar e Rb-Sr confirmam este período de formação destas rochas (Sonoki & Garda, 1988). Por outro lado, trabalhos sobre a gênese destas intrusões têm sido utilizados para definir a possibilidade de sua formação por outros processos crustais, como flexura crustal ou correlação com bacias sedimentares contemporâneas às intrusões.

O lineamento Poços de Caldas - Cabo Frio compreende intrusões alcalinas félsicas alinhadas na direção WNW-ESE de Poços de Caldas até Cabo Frio. Esses corpos intrudem o embasamento na forma de stocks e *plugs*, além disso, são cortados por numerosos diques cuja espessura varia de centímetros a dezenas de metros. A linearidade dos corpos levou à proposição de um modelo no qual a Plataforma Sul Americana teria passado sobre um *hot spot* com decréscimo de idades de oeste para leste.

Figura 1 - Alinhamento magmático Poços de Caldas - Cabo Frio.



Fonte: O autor 2019.

Nessa tese foram investigados quatro corpos que compõem o Lineamento Poços de Caldas Cabo Frio: Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá. Os três primeiros foram investigados por meio de petrografia, litogeoquímica, datação U-Pb em zircão por meio da técnica de *Laser Ablation* e isótopos de Lu-Hf. No caso da intrusão de Tinguá é apresentada uma geoquímica preliminar com quatro amostras, bem como, dados geocronológicos que também envolveram datação U-Pb e isótopos de Lu-Hf.

1 **OBJETIVOS**

1.1 **Objetivos Gerais**

Investigar as fontes mais prováveis para o magmatismo alcalino do lineamento Cabo Frio a partir das intrusões analisadas nessa tese. Além disso, contribuir com dados que auxiliem na construção de um modelo geodinâmico para essa província alcalina.

1.2 **Objetivos Específicos**

Estudar os diferentes litotipos que compõem as intrusões supracitadas de modo a entender a evolução dos magmas, a cronologia dos corpos e as relações entre eles no contexto da Província Alcalina como um todo.

2 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

2.1 Magmatismo alcalino do sudeste brasileiro

As suítes alcalinas no sudeste do Brasil ocorrem ao longo de dois grandes lineamentos magmáticos, de direção NW-SE e NE-SW, na plataforma Sul-Americana (Ulbrich & Gomes, 1981). Parte do primeiro lineamento compreende o assim denominado alinhamento magmático Poços de Caldas-Cabo Frio. Este lineamento é caracterizado por 30 corpos de rochas alcalinas intrusivas (sob formas de stocks e *plugs*), 5 ocorrências de rochas efusivas, além de numerosos diques. As idades desse magmatismo variam de 84-49 Ma (métodos Ar/Ar, K-Ar e Rb-Sr) desde Poços de Caldas até Cabo Frio, sendo a maior parte desses corpos situados entre os maciços de Itatiaia, Passa Quatro e Morro de São João (Almeida, 1991).

2.2 Modelos Geodinâmicos para o Lineamento Cabo - Frio

Três modelos geodinâmicos têm sido utilizados para explicar o magmatismo alcalino do Cretáceo superior na porção meridional da Plataforma Sul-Americana (Faistein & Summerheys, 1982; Almeida, 1991; Thompson *et al*.,1998; Thomas Filho *et al*., 2000):

a) Reativação de falhas fundamentais (ou transformes continentais);
b) Atividade de *hotspots*; e
c) Combinação dos dois modelos anteriores.

O princípio de reativação de falhas fundamentais ou transformes continentais está diretamente associado ao subparalelismo de lineamentos continentais e oceânicos observado na margem passiva atlântica da Plataforma Sul-Americana (p.ex.: Gorini & Bryan, 1976).

Os trabalhos de Almeida (1971, 1972, 1991) relacionam o magmatismo alcalino da Plataforma Sul-Americana a um controle tectônico. Almeida (1991) sugere que tanto as ilhas vulcânicas e montes submarinos do complexo vulcânico de

Abrolhos e da cadeia Vitória-Trindade como o alinhamento magmático Poços de Caldas - Cabo Frio, estão localizados sobre extensas zonas de fraturas por onde o magma ascendeu durante reativações. Oreiro *et al* (2008) analisaram cuidadosamente falhas *strike-slip* inferidas por Cobbold *et al* (2001) e concluíram que esses corpos ígneos estão alojados na interseção de falhas de direção SE-NW com falhas de direção SW-NE.

O modelo de magmatismo associado a plumas e *hot spots* é defendido por vários autores (Herz, 1977; Sadowski e Dias Netto, 1981; Gibson *et al*., 1995; Thompson *et al*., 1998; Szatmari *et al*., 2000; Assumpção *et al*., 2004; Thomaz Filho *et al*., 2005). Esse modelo propõe que a atividade alcalina do Cretáceo superior no sudeste do Brasil pode ter sido causada pelo impacto de uma pluma (Trindade-Martim Vaz) na base da litosfera continental.

O terceiro modelo tenta associar a reativação de falhas com a presença de uma anomalia térmica (tipo pluma) no sudeste brasileiro no Cretáceo superior (Faistein & Summerheys, 1982; Thomas Filho *et al*., 2000). Este modelo conciliatório explica a atividade magmática relacionada ao alinhamento Poços de Caldas-Cabo Frio como resposta a uma anomalia térmica mantélica posicionada nas proximidades da cadeia de Vitória-Trindade até o Eoceno.

Thompson *et al* (1998) defenderam a ideia de que o traço da pluma de Trindade teria sido ativo por baixo do Cráton São Francisco entre 85 e 55 Ma e a grande espessura litosférica da área (200 a 250 km), teria “desligado” a atividade da pluma até ela alcançar a região costeira (mais delgada), onde fusão por descompressão gerou o magmatismo da Serra do Mar seguindo em direção às ilhas de Trindade e Martin Vaz após 55 Ma. Essa hipótese é pautada em uma anomalia de geoide positiva linear localizada abaixo da parte sudeste do Cráton São Francisco entre o Alto Paranaíba e a cadeia de montes submarinos de Vitória.

De acordo com o trabalho de O’Connor e Duncan (1990) que apresentam 16 dados de idades ^{40}Ar-^{39}Ar de rochas vulcânicas (basaltos variando de toleíticos a alcalinos) coletadas em 10 locais distribuídos na Cadeia Walvis, e uma amostra localizada no Alto Rio Grande, a origem desse sistema vulcânico, bem como, dos derrames basálticos do Paraná e Entendeka têm como fonte a pluma de Tristão da Cunha. Essa ideia é apoiada pela comparação de razões Zr/Nb de basaltos formados no eixo de espalhamento com aqueles gerados em ambiente intraplaca.

Os mesmos autores concluíram por meio de reconstruções da relação espacial entre o eixo de espalhamento, o *hot spot* e a evolução do sistema Walvis Ridge-Alto Rio Grande que, há cerca de 70 Ma houve uma migração do eixo de espalhamento para oeste, consequentemente ocorreu uma transição do vulcanismo que saiu do eixo da dorsal e passou para intraplaca concluindo assim a formação do Alto Rio Grande. Tal mudança na direção do eixo de espalhamento pode ter implicações na formação das bacias marginais brasileiras.

2.3 **Origem dos magmas alcalinos**

A origem de magmas alcalinos insaturados em sílica foi debatida por muitas décadas. De acordo com as primeiras hipóteses magmas alcalinos primários não foram gerados no manto ou crosta inferior, eles foram criados a partir de magmas basálticos subalcalinos primitivos via superposição da diferenciação. Uma proposta invocou a conversão de magma saturado em sílica a magma insaturado em sílica por assimilação de calcário, hipótese baseada na erupção de magmas ricos em leucita do monte Vesúvio na Itália. Essas lavas insaturadas em sílica carregam abundantes xenólitos de carbonato coletados durante sua ascenção por cerca de 3 km de rochas mesozoicas. Metassomatismo dos xenólitos criou minerais de Ca-Si tal como diopsídio, enquanto complementarmente, contaminação e saída de sílica do magma hospedeiro acreditou-se originar magma insaturado em sílica (Best, 2003).

Entretanto, essa teoria falhou em explicar muitos aspectos da geração de magma em uma base global, por exemplo a ausência de calcário suficiente na crosta oceânica para produzir rochas alcalinas amplamente espalhadas de ilhas vulcânicas. Magmas alcalinos em muitos ambientes tectônicos, incluindo riftes continentais, têm composições químicas primitivas que demonstravelmente não são o resultado de contaminação crustal (Best, 2003).

Outro processo hipotético insustentável é o fracionamento de cristais sob baixa pressão a partir de magma basáltico subalcalino, já que, líquidos residuais são mais ricos em sílica e não insaturados (Yoder e Tilley, 1962).

Assim, é necessário um meio de gerar magmas alcalinos primários. Provavelmente isso se daria no manto, já que, muitos dos magmas menos evoluídos

são muito máficos ou mesmo ultramáficos. Subsequentemente, esses magmas alcalinos primitivos podem ser diferenciados a magmas filhos alcalinos, tal como em ilhas oceânicas como Tristão da Cunha no atlântico (Best, 2003).

Magmas primários insaturados em sílica podem ser gerados a relativamente altas pressões e concentrações de CO_2 e especialmente por pequenos graus de fusão parcial de espinélio ou granada peridotito. Pequenos graus de fusão parcial (ex: F~1%) que são acreditados capazes de segregar da sua fonte (Mckenzie, 1985) são enriquecidos nos elementos mais incompatíveis por fatores de cerca de 100.

Entretanto, o enriquecimento de elementos incompatíveis em alguns magmas primitivos que carregam xenólitos do manto, e assim, provavelmente sofreram pouca modificação da sua fonte, é muito extremo para uma origem envolvendo pequenos graus de fusão parcial ser válido. Esses magmas são representados por raras rochas altamente alcalinas, geralmente altamente potássicas, máfias e ultramáficas encontradas em riftes continentais e crátons estáveis como kimberlitos, lamproitos, kamafugitos e minettes ricos em flogopita. Essas rochas comumente contem xenólitos derivados do manto e localmente as duas primeiras hospedam diamantes, indicando um transporte rápido das profundezas do manto. Concentrações normalizadas da maioria dos elementos incompatíveis nessas rochas são mais enriquecidas por cerca de uma ordem de magnitude do que em menores graus de fusão parcial (F = 0,1-1%) de uma fonte granada lherzolito (Best, 2003).

Para a maioria dos petrólogos o manto enriquecido metassomaticamente é a mais razoável fonte ou pelo menos uma contribuição para magmas alcalinos e é provavelmente a única fonte para kimberlitos altamente alcalinos, lamproitos e kamafugitos. A suíte de inclusões ultramáficas comumente ocorrendo nessas rochas primitivas inclui manto metassomatizado de clinopiroxênio rico em Al-Fe-Ti que contém abundante flogopita e anfibólio richterita rica em K. Dados indicam fatores de enriquecimento apenas modesto (<10) entre lamproito representativo e xenólito metassomático, o que sugere que o último pode ser uma fonte de fusão parcial do primeiro (Best, 2003).

2.4 **Tipos de Fontes Mantélicas**

Pelo menos quatro (DM, EM1, EM2 e HIMU) e talvez seis componentes isotópicos podem existir no manto a partir de resultados disponíveis de basaltos oceânicos (Hart, 1988; Hart *et al*. 1992). O manto empobrecido (*DM depleted mantle*), é a fonte de basaltos de cadeia oceânica normais (NMORB). Este componente passou por um ou mais períodos de extração de magmas basálticos e tem caráter isotópico empobrecido, ou seja, baixa razão $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ e alta razão $^{143}Nd/^{144}Nd$ além de baixa concentração de elementos incompatíveis.

Duas fontes enriquecidas (*EM enriched mantle*) são propostas na literatura, as quais refletem o enriquecimento a longo prazo de terras raras na fonte. O EM1 tem relativamente baixa razão $^{206}Pb/^{204}Pb$ e moderada razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ comparado ao EM2, o qual tem intermediaria razão $^{206}Pb/^{204}Pb$ e alta razão $^{87}Sr/^{86}Sr$. Os dois componentes enriquecidos tem alta razão $^{207}Pb/^{204}Pb$ em relação a $^{206}Pb/^{204}Pb$ comparado com o MORB e ambos têm baixa razão $^{143}Nd/^{144}Nd$. EM1 é característico das ilhas de Pitcairn e Tristão da Cunha enquanto a fonte EM2 ocorre nas ilhas de Sociedade e Samoua.

HIMU é distinguido por sua alta razão U/Pb ($\mu = {}^{238}U/^{204}Pb$) na fonte. O extremo enriquecimento em ^{206}Pb e ^{208}Pb em alguns basaltos de ilha oceânica como por exemplo Santa Helena requer a existência de uma fonte do manto enriquecida em U+Th em relação ao Pb, e isócronas do manto sugerem uma idade para essa fonte da ordem de 2.0 a 1.5 Ga. Devido HIMU ter razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ similar a do NMORB, foi sugerido que ele pode representar crosta oceânica subductada na qual a razão U+Th/Pb foi aumentada pela perda preferencial de Pb no escape de voláteis da placa em subducção. Apoio a origem da crosta oceânica reciclada para HIMU está no relativo enriquecimento em Ta e Nb em muitos basaltos de ilha oceânica.

FOZO (Focal Zone) é um reservatório empobrecido adicional (distinto do MORB) sugerido pela convergência de trends de ilhas oceânicas e pela assinatura isotópica Sr-Pb-Nd. Esse reservatório é interpretado como sendo representante de um componente comum de pluma localizado no manto inferior (Hart *et al*. 1992, Hauri *et al*. 1994, Hofmann 1997, Hilton *et al*. 1999). O componente FOZO é provavelmente o mesmo que PHEM (*Primitive Helium Mantle*) que é visto no arranjo isotópico de He versus Sr, Nd e Pb (Farley *et al* 1992, Van Keken *et al*. 2002) e "C"

(Comum) por extrapolação de tendências nos dados MORB (Hanan & Graham 1996, Hilton *et al*. 1999). Esse componente empobrecido também tem alto $^{176}Hf/^{177}Hf$ (Kempton *et al*. 2000) e alta razão isotópica $^{187}Os/^{188}Os$ (Shirey & Walker 1998, Van Keken *et al*. 2002). Altas razões $^{3}He/^{4}He$ são observadas no Hawaii, Islândia, Bouvet, Galapagos, Ilha de Páscoa, Juan Fernandez, Pitcairn, Samoua, Reunion e Ilha Heard (Hofmann 1997, Van Keken *et al*. 2002). FOZO pode ser distinguido do DMM (Depleted MORB Mantle) por seu maior valor de isótopos de $^{3}He/^{4}He$ e razões $^{143}Nd/^{144}Nd$ levemente menores.

2.5 **Plumas e *Hot Spots***

Após a teoria da tectônica de placas ser amplamente aceita, tornou-se claro que várias regiões vulcânicas notáveis não se ajustavam a esse modelo geral. A mais espetacular eram as grandes ilhas do Hawaii e sua cadeia de ilhas associadas, conhecida desde o trabalho pioneiro de James Dwinght Dana (1813-1895). O arquipélago havaiano se localiza no interior da vasta placa do pacífico, milhares de quilômetros do limite de placa mais próximo. J. Tuzo Wilson sugeriu que ela surgiu do movimento do fundo do oceâno pacifico sobre uma região quente do manto (Wilson, 1963). A partir desses trabalhos pioneiros surgiu a expressão "hot spot" e a semente foi plantada para a moderna hipótese que qualquer vulcanismo anusual no contexto da tectônica de placas resulta de um local de excepcionalmente alta temperatura sob as placas.

O modelo de pluma do manto foi inicialmente proposto por Morgan (1971) que a descreveu como ressurgência quente de material relativamente primordial que sobe do manto profundo e alimenta o *hot spot* em superfície. Tais plumas sobem por causa da flutuabilidade termal, e devem ser originadas em uma camada de limite termal. A única camada limite no manto profundo com tais características é o limite manto núcleo (camada D), assim as plumas do tipo-Morgan seriam originadas dessa camada.

Courtillot *et al* (2003) propuseram que *hot spots* podem vir de diferentes limites de camadas no manto, e ainda propuseram critérios para diagnosticar uma potencial origem profunda quais sejam: traços de longa vida, armadilhas na sua

iniciação, fluxo de flutuabilidade mínimo de 10^3 $Kg.s^{-1}$, alta razão He ou Ne além de baixa velocidade de ondas a 500 Km de profundidade. De acordo com esses parâmetros os mesmos autores elegem o *hot spot* de Tristão da Cunha como sendo primário, ou seja, mais provável de ter sua origem em uma pluma mantélica.

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

3.1 Pesquisa bibliográfica

A metodologia aplicada nesse trabalho teve início com a pesquisa bibliográfica, na qual foram reunidos trabalhos anteriores realizados sobre as rochas alcalinas da Província Alcalina do Sudeste, bem como aqueles envolvendo petrografia, litogeoquímica e geocronologia U-Pb e Lu-Hf, tal como artigos publicados em revistas, dissertações e teses. O intuito desta pesquisa foi reunir elementos para entender a problemática da área envolvida.

3.2 Geologia de Campo

Trabalhos de campo foram realizados nas intrusões alcalinas de Soarinho, Tanguá, Rio Bonito e Tinguá com o objetivo de observar as relações de campo existentes entre os litotipos plutônicos e vulcânicos rasos bem como suas rochas encaixantes. Além disso, foram coletadas várias amostras as mais frescas possível abrangendo todos os diferentes litotipos observados que serviram à confecção de lâminas delgadas, preparação para obtenção de dados geocronológicos bem como dados litogeoquímicos.

3.3 Processamento de Amostras

Após a etapa de campo, as amostras foram levadas para o Laboratório Geológico de Preparação de Amostras (LGPA) para que fossem realizados os procedimentos necessários para separação de grãos bem como, a confecção de laminas e *slabs* para geoquímica.

3.4 **Química de Rocha Total**

As amostras coletadas em campo foram serradas em forma de slabs e enviadas ao Activation Laboratories Ltd do Canadá. Foram obtidas assim as concentrações dos elementos maiores (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3T, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, TiO_2 e P_2O_5) em porcentagem de peso na forma de óxidos, além das concentrações dos elementos traços móveis (Ba, Rb, Sr, U e Th), imóveis (Zr, Y, Nb e Hf), os elementos Ni, Cr, V e Co bem como os elementos terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Eu, Tb, Dy e Ho) em partes por milhão. Nesta análise também foram obtidos dados de perda ao fogo (LOI - *Loss On Ignition*). O laboratório usou o método FUS-ICP para a dosagem dos óxidos maiores e também para os seguintes elementos: Sc, Be, V, Ba, Sr, Y e Zr. Para os demais elementos foi utilizado o método FUS-MS.

A técnica mais agressiva de fusão (FUS) aplica uma fusão de metaborato/tetraborato. Fusão é feita por um robô no Actlabs o que fornece um processo rápido e de mais alta qualidade na indústria. A amostra fundida é rapidamente digerida em uma solução de ácido nítrico fraco. A fusão garante que a amostra seja dissolvida inteiramente. É apenas com esse ataque que óxidos maiores incluindo SiO_2, minerais refratários (por ex: zircão, titanita, monazita, cromita, gahnita, etc.), elementos terras raras e outros com alto campo de força (*high field strenght elements*) são colocados em solução. Rochas ricas em sulfeto podem requerer diferente tratamento mas podem ainda ser adequadamente analisadas.

A técnica do *inductively coupled plasma* (ICP) é um meio particularmente efetivo de excitar átomos. Nessa técnica as amostras previamente dissolvidas são misturadas com gás argônio enquanto elas são aspiradas dentro de um gerador de rádio frequência onde um plasma é criado. A linha de emissão relacionada a cada elemento é isolada por uma grade de difração e detectada por uma série de fotomultiplicadores cada um em um canal separado ajustado para um elemento especifico. Todos os canais são simultaneamente contados e conectados a um computador, onde os dados são reduzidos e a concentração de cada elemento é calculada. Um bom e moderno ICP pode produzir análises químicas de mais de 60 elementos em questão de minutos desde que as amostras estejam preparadas.

Já na técnica do *mass spectrometry* (ICP-MS) as amostras são aquecidas,

ionizadas e os íons são introduzidos dentro de uma câmara de vácuo com um forte campo magnético. A corrente de íons carregados segue um caminho curvado no campo magnético. Devido a sua massa e carga, íons mais pesados seguem um caminho com um maior raio de curvatura. Íons de cada massa são contados assim que eles passam através das fendas em um detector carregado. Esse instrumento não é como o ICP-OES em que ele não depende de emissão ou absorção, mas ele fisicamente dissocia a amostra e fisicamente conta as partículas de uma massa particular.

Nas 16 amostras da intrusão de Soarinho analisadas a soma dos valores da porcentagem em peso dos Óxidos maiores com os valores de perda ao fogo está entre 98,7 e 100,6. O valor de perda ao fogo dessas amostras analisadas é inferior a 2,5 %. As amostras analisadas da intrusão de Rio Bonito têm soma dos valores da porcentagem em peso dos óxidos maiores com os valores de perda ao fogo entre 98,3 e 100,2. Das 23 analises de Rio bonito 18 apresentam valor de perda ao fogo abaixo de 3 % enquanto que 5 estão acima desse valor e abaixo de 5%. Das 4 amostras analisadas da intrusão de Tinguá todas têm valor de perda ao fogo abaixo de 2 % e a soma dos valores da porcentagem em peso dos óxidos maiores com os valores de perda ao fogo está entre 98,5 e 101.

O *software* usado no tratamento dos dados litogeoquímicos foi o GCDKIT 2.3 (*Geochemical Data Tool Kit* - Janousek *et al*, 2006). Através desse programa foi possível confeccionar diagramas de classificação, elementos terras raras e multi-elementares, além da obtenção da norma CIPW. Diagramas de variação bem como valores de R^2 foram obtidos com o *software Microsoft Excel* 2010.

3.5 **Separação de Zircões**

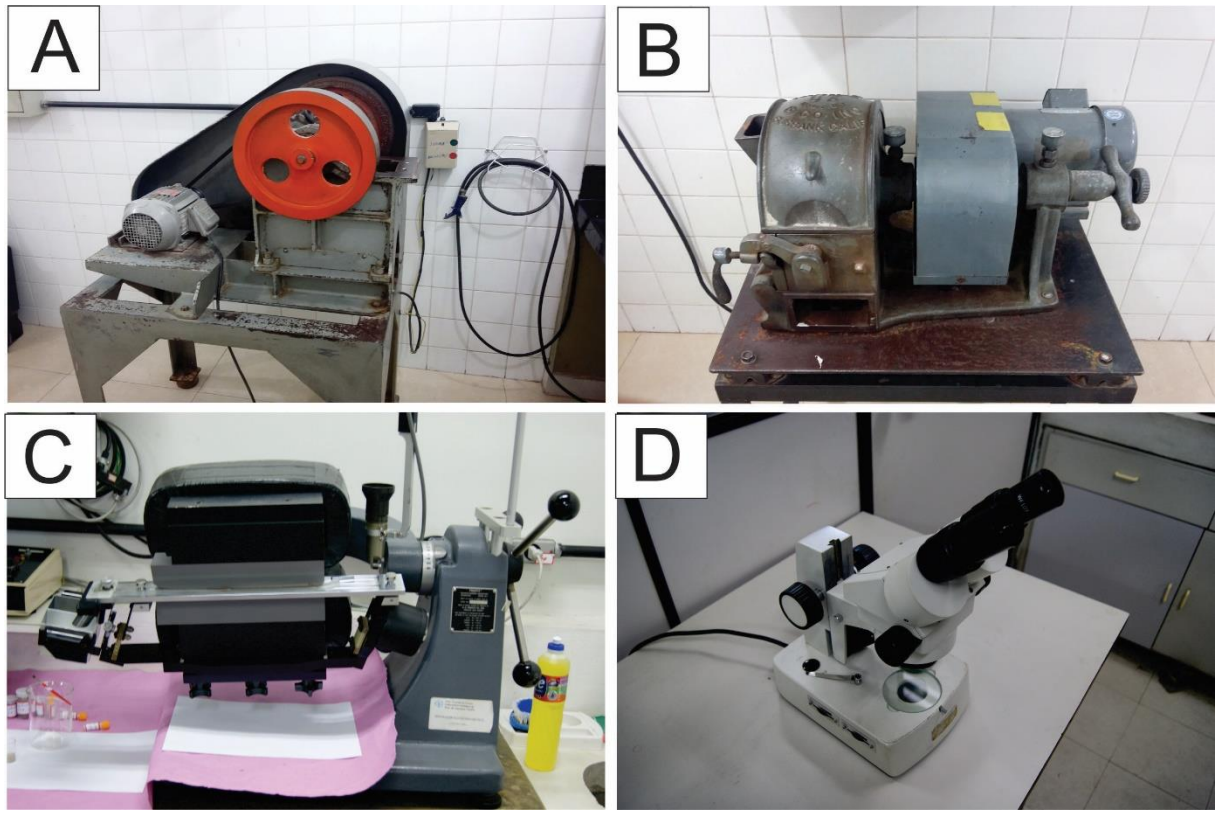
As amostras que foram coletadas com o intuito de fazer a separação de zircões foram lavadas com água para tirar o excesso de sujeira e então postas para secar em estufa. Após a secagem as amostras com tamanho de cerca de 10 cm foram fragmentadas em um moinho de mandíbulas (figura 2 A). O procedimento é realizado em sala com sistema apropriado de exaustão para que o pó de rocha não seja inalado. As amostras são trituradas uma primeira vez com as mandíbulas

espaçadas e o material que sai tem em torno 2 a 3 cm de diâmetro. Uma segunda britagem é realizada com as mandíbulas aproximadas diminuindo assim o tamanho dos fragmentos em cerca de 1 cm. O material recém britado é então levado ao moinho de discos (figura 2 B) onde é passado duas vezes até se obter um pó de rocha. O pó de rocha obtido foi então peneirado com uma peneira de 100 mesh e separado em duas frações uma maior e outra menor que 100 mesh.

As duas frações foram bateadas para separação de minerais pesados. A batéia manual é uma espécie de separação por densidade na qual os minerais leves são jogados para fora com o movimento circular do bateador enquanto os minerais pesados decantam no fundo da batéia. Após o bateamento, as amostras foram secadas em estufa e em seguida foi usado um imã de mão para retirar os minerais magnéticos presentes (principalmente magnetita). A etapa seguinte é a separação por liquido denso na qual foi usado bromofórmio. O bromofórmio é um liquido cuja densidade é de 2,89 g/cm³ de modo que minerais leves como K-feldspato (densidade 2,70 g/cm³) boiam na superfície do liquido enquanto minerais pesados como o zircão (densidade 4,6 a 4,7 g/cm³) afundam. Vale ressaltar que o bromofórmio é um liquido toxico e sendo assim a separação com esse liquido é feita em local apropriado onde os gases são sugados para fora do laboratório.

Por fim, foi usado o separador eletromagnético Frantz (modelo LB - 1) (figura 2 C) que separa minerais de diferentes suscetibilidades magnéticas pelo uso de um eletroímã. O Frantz é constituído de um eletroímã, uma régua na qual os minerais são separados e dois coletores (um para a fração atraída e outro para a não atraída). O procedimento é feito em duas etapas chamadas de Frantz inicial e Frantz final. No Frantz inicial a inclinação lateral da régua é fixada em 10º e a inclinação frontal é fixada em 5º as amperagens, no entanto, são alteradas passando por 0,2A; 0,5A; 0,75; 1,0A até 1,5A (amperagem máxima). Na etapa final do Frantz a inclinação frontal é mantida em 5º e a amperagem é mantida no máximo (1,5A) sendo variada a inclinação lateral da régua que passa por 5º, 3º, 1º, 0º e -0,5º. Todas as frações atraíveis são separadas em recipientes devidamente identificados. A fração que não é atraída na última etapa do Frantz final (-0,5º) é separada em um recipiente com a identificação não atraível.

Figura 2 - Equipamentos usados na etapa de separação de zircões.



Legenda: (A) moinho de mandíbula, (B) moinho de disco, (C) separador eletromagnético Frantz, (D) lupa binocular.
Fonte: O autor 2019.

As amostras separadas com o Frantz são destinadas a coleta dos grãos de zircão a serem datados. O procedimento de coleta é feito colocando o conteúdo de um dos recipientes em uma placa de vidro e observando com uma lupa binocular (figura 2 D) para separar os grãos colocando-os em uma fita adesiva. Esse procedimento de coleta é realizado em cada uma das frações do Frantz final onde normalmente são encontrados os zircões. Os grãos separados em cada fração são colocados em uma fita adesiva única apoiada em uma lâmina de vidro. A partir daí começa a montagem do epóxi no qual os zircões são fixados. Sobre o arranjo de grãos é colocado um molde plástico de modo que os grãos fiquem centralizados em relação ao molde, em seguida, o molde é preenchido com uma resina de araldite. O arranjo é posto para secar em estufa por algumas horas. Ao final, retira-se o tubo plástico e o arranjo resina mais grãos é polido para que a superfície dos grãos fique exposta e sem resina, o que atrapalharia na hora da análise por laser.

A etapa seguinte e que precede a datação propriamente dita é o imageamento dos zircões por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

No MEV a amostra é colocada em uma espécie de câmara de vácuo e investigada escaneando-se um feixe de elétrons através da amostra. Apenas a superfície das amostras pode ser estudada. Os elétrons incidem a superfície da amostra e são espalhados de volta ou provocam a emissão de elétrons secundários. Em ambos os casos, os sinais são coletados por detectores. Os elétrons que chegam aos detectores são usados para construir uma imagem da amostra (em tons de cinza). Para esse trabalho foram produzidas imagens de catodoluminescência e elétrons secundários que serão detalhadas a seguir.

As imagens de catodoluminescência dos zircões mostram a estrutura interna dos grãos a serem datados, dessa forma, pode-se determinar se os grãos passaram por algum evento posterior a cristalização (por exemplo metamorfismo) ou são estritamente ígneos. No caso das imagens de elétrons secundários, observa-se a superfície dos grãos de modo a detectar possíveis fraturas. Tais fraturas devem ser evitadas no momento da analise já que resultariam em dados ruins.

3.6 **O método U-Pb**

Parte das analises U-Pb (referente as amostras SOA-01A, SOA-02A, SOA-05, TIG-01A, TIG-02A e TIG-03) foram realizadas no laboratório MultiLab da UERJ com a utilização de ablasão a laser com espectrometria de massa por plasma induzido (LA-ICP-MS) e o aparelho usado foi o Neptune da Thermo Scientific. As demais analises (referente as amostras RB-01, RB-02, TAG-01 e TAG-02) foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto que utiliza a mesma técnica de datação. Os resultados são apresentados em diagramas Concórdia tipo Tera e Wasserburg (1972) construídos com o programa ISOPLOT (Ludwing, 2003).

As condições do laser utilizadas nas análises das amostras de Soarinho foram entre 30 e 85 µm para o diâmetro das crateras com frequência de 10 Hz. Três amostras da intrusão de Soarinho foram selecionadas para a datação U-Pb: SOA-01A (quartzo sienito), SOA-02A (monzonito) e SOA-05 (álcali feldspato sienito). Para cada amostra foram feitos dois blocos de analises cada um contendo 9 tiros totalizando assim 18 pontos analisados.

As condições do laser utilizadas nas análises de Tinguá foram entre 30 e 85 µm para o diâmetro das crateras, potência de 70% e frequência de 10 Hz. O aumento do diâmetro das crateras bem como da potência do laser se justifica pelo fato de alguns zircões terem pouco Pb (< 20 ppm) e esse procedimento melhorou a leitura do aparelho e a qualidade dos dados.

Para a amostra TIG-01A foram realizados 4 blocos de análises (A, B, C e D) cada um contendo 9 tiros totalizando 36 pontos analisados. Ainda sobre a amostra TIG-01A, o bloco B foi descartado devido o padrão GJ1 apresentar razão $^{206}Pb/^{238}Pb$ acima do intervalo tolerado. Para as outras duas amostras (TIG-02A e TIG-03) foram realizados 3 blocos de analises totalizando 27 pontos analisados sendo que para essas amostras nenhum bloco foi descartado.

O procedimento padrão de analises U-Pb realizado no MultiLab em cada bloco de analises foi o seguinte: começou com a análise do branco, em seguida, foi analisado o padrão GJ1 e então foram realizadas 9 analises nos zircões da amostra, na sequência, foi feita uma análise do padrão 91500, outra análise do padrão GJ1, finalizando cada bateria com outra análise do branco.

As análises U-Pb realizadas no Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto usaram um sistema de ablasão a laser acoplado a um *sector field inductively coupled plasma mass spectrometry* LA-SF-ICP-MS (*Element* 2). Para avaliar a precisão e acurácia dos resultados obtidos foram analisados os seguintes zircões padrão: GJ-1 (608,5 ± 1,5 Ma), BB (562,58 ± 0,26 Ma) e Plesovice (337 ± 1 Ma).

3.7 **O método Lu-Hf**

^{176}Lu é um radionuclídeo instável que passa por espontâneos decaimentos beta (-) até o estável ^{176}Hf, com uma meia-vida de aproximadamente 35 bilhões de anos. Variações na abundancia de ^{176}Hf são convencionalmente expressadas com relação a ^{177}Hf cuja abundancia natural é constante.

^{176}Lu constitui 2,6% do Lutércio natural, o mais pesado dos terras raras. Em termos de rocha total, Lu tende a residir principalmente em minerais ricos em elementos terras raras pesados tal como granada, zircão e xenotima. Háfnio é um

high field strenght element (HFSE) cuja geoquímica é virtualmente idêntica a do zircônio. Assim o principal local para Hf em rochas é como um elemento menor substituto do Zr em zircão ou em raros minerais ricos em Zr. A maioria dos cristais de zircão contém 0,5-2,0 % em peso de HfO_2, porem zircões extremamente ricos em Hf são reportados, por exemplo, em pegmatitos mineralizados em metais raros (Correia Neves *et al*. 1974).

O sistema isotópico Lu-Hf pode ser usado para traçar a história de diferenciação química (crosta e manto) em virtude do fato de o fracionamento de Lu a Hf ocorreu durante a geração de magma. A razão inicial Lu/Hf da terra, que era inicialmente uniforme e próxima do condrito, tem sido progressivamente modificada com o passar do tempo geológico. Dessa forma, episódios de fusão parcial no manto superior geraram magma empobrecendo o manto residual em Hf (o mais incompatível dos dois elementos) e correspondentemente enriquecendo nesse elemento a crosta então gerada. Através do tempo, a composição isotópica do Hf do manto empobrecido (Lu/Hf > condrito) e da crosta enriquecida (Lu/Hf < condrito) diverge daquela de qualquer material não fracionado remanescente (Lu/Hf = condrito).

Como em outros sistemas isotópicos, desvios da composição isotópica de Hf em relação a composição de Hf do condrito em qualquer tempo 't' são expressas em unidades épsilon (partes por 10.000) como dado pela seguinte formula:

épsilon Hf = $[(^{176}Hf/^{177}Hf)t/(^{176}Hf/^{177}Hf)\ condrito - 1] \times 10^4$

Assim, amostras com $^{176}Hf/^{177}Hf$ maior que o condrito no tempo t tem valores épsilon Hf positivos, enquanto aquelas com $^{176}Hf/^{177}Hf$ menor que o condrito tem épsilon Hf negativo. Condritos propriamente ditos tem épsilon Hf = 0.

A razão $^{176}Lu/^{177}Hf$ do zircão é geralmente < 0,0005, o que significa que mudanças integradas no tempo à razão $^{176}Hf/^{177}Hf$ como um resultado de decaimento in situ de ^{176}Lu procedeu a taxas virtualmente negligenciáveis. Assim, zircão efetivamente preserva a razão inicial $^{176}Hf/^{177}Hf$, fornecendo um durável registro da composição isotópica do Hf da sua região fonte no tempo da cristalização. Essa razão pode então ser usada para determinar uma idade modelo Hf (com relação ao manto empobrecido) se a idade de cristalização do zircão é conhecida independentemente da datação U-Pb e determina-se um valor inicial de épsilon Hf em relação à curva de referência da evolução do isótopo de Hf para o valor do condrito.

Assim, a composição isotópica de Hf do zircão pode ser usada como um traçador geoquímico de uma origem da rocha hospedeira exatamente do mesmo modo que isótopos de Nd em análises de rocha total são usados. Hf é de fato um traçador mais sensível que Nd, visto que Lu/Hf no manto empobrecido aumentou a aproximadamente o dobro da taxa de Sm/Nd com relação a material não fracionado (Patchett e Tatsumoto 1980b). Além disso, a bem conhecida resiliência do zircão a processos intemperismo superficial, transporte e sedimentação significa que a mesma técnica de traçamento isotópico pode ser aplicada para elucidar origens de grãos de zircão detríticos em rochas sedimentares e metassedimentares.

As analises Lu-Hf de todas as amostras desta tese foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto. Os tiros de laser foram realizados nos mesmos pontos das analises U-Pb. Um sistema de ablasão a laser Photon-Machines (ArF excimer laser 193 nm) acoplado a um Neptune MC-ICP-MS foi usado para medir as assinaturas isotópicas de Lu, Yb e Hf nos zircões analisados. Os padrões utilizados durante as análises de Hf foram Gj1, BB e Plesovice.

Razões iniciais $^{176}Hf/^{177}Hf$ e ƐHf foram calculadas usando a idade $^{207}Pb/^{206}Pb$ aparente determinada por LA-SF-ICP-MS. Os parâmetros CHUR são: $^{176}Lu/^{177}Hf$ = 0,0336 e $^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0,282785 de acordo com Bouvier *et al* (2008). Os valores de TDM foram calculados a partir das seguintes constantes geralmente usadas: Avg MORB - Chauvel *et al* (2008), BLIC TDM - Blichert-Toft *et al* (2008) e NC TDM - Dhuime *et al* (2011).