



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Camila Cardoso Nogueira

**Petrogênese da Suíte Intrusiva Santa Clara com base em litogeoquímica,
geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Lu-Hf: registro de magmatismo
rapakívítico no SW do Cráton Amazônico**

Rio de Janeiro

2016

Camila Cardoso Nogueira

Petrogênese da Suíte Intrusiva Santa Clara com base em litogeoquímica, geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Lu-Hf: registro de magmatismo rapakivítico no SW do Cráton Amazônico

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

Orientador: Prof. Dr. Mauro César Geraldès

Coorientadora: Prof.^a Dra. Mônica da Costa Pereira Lavallo Heilbron

Rio de Janeiro

2016

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

N689 Nogueira, Camila Cardoso.
Petrogênese da Suíte Intrusiva Santa Clara com base em litogeoquímica, geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Lu-Hf: registro de magmatismo rapakivítico no SW do Cráton Amazônico / Camila Cardoso Nogueira. – 2016.
158f.

Orientador: Mauro César Geraldês.
Coorientadora: Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Granito – Santa Clara, Maciço (RO) – Teses. 2. Petrologia – Santa Clara, Maciço (RO) – Teses. 3. Rapakivi – Santa Clara, Suíte (RO) – Tese. 4. Geoquímica – Teses. 5. Tempo geológico – Teses. 6. Geologia isotópica – Teses. I. Geraldês, Mauro César. II. Heilbron, Mônica da Costa Pereira Lavalle. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

.CDU 552.321(811.1)

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

Assinatura

Data

Camila Cardoso Nogueira

**Petrogênese da Suíte Intrusiva Santa Clara com base em litogeoquímica,
geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Lu-Hf: registro de magmatismo rapakivítico
no SW do Cráton Amazônico**

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

Aprovado em 23 de fevereiro de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mauro César Geraldês (Orientador)
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof^a. Dr^a. Beatriz Paschoal Duarte
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Sérgio Willians
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Júlio Cezar Mendes
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Dr. Carlos Eduardo Ganade de Araújo
CPRM/RJ

Rio de Janeiro

2016

AGRADECIMENTOS

E mais uma vez eu venho aqui, escrever a parte de “Agradecimentos”, dessa vez da minha tese. Uau, mais três anos se passaram e o tempo passa assim, sempre voando e dando pra gente momentos preciosos. E mais uma vez, vem aquele medo de esquecer de mencionar alguém e cometer alguma injustiça – desde já peço desculpas caso isso aconteça.

SEMPRE em primeiro lugar, um “*super* obrigada” à minha família, que sempre me apoiou, incentivou e aturou meus momentos de mau-humor e irritação (são muitos, bem sei). Um “obrigado” à tia Carlota e vovó, que me olham lá de cima e me ajudam a alcançar meus sonhos. À minha Nina, agradeço pelo eterno companheirismo e só lamento termos nos encontrado tão tarde nessa vida. Queria mais.

Um agradecimento mais do que especial ao meu orientador e amigo Mauro; que sempre me incentivou e sem seu apoio eu jamais teria ido a lugares tão especiais e conhecido pessoas tão incríveis. Agradeço a confiança depositada em mim durante todo esse tempo em que trabalhamos juntos. À minha co-orientadora, Mônica, nem sei como agradecer. Eu me sinto muito afortunada por ter tido a chance de me aproximar de você e termos construído essa relação que significa tanto pra mim. Continuo sua fã, sempre. À sempre querida Prof^a. Dr^a. Beatriz Paschoal Duarte, por toda a paciência e carinho com que sempre me acolheu, pelos ensinamentos, pela discussão dos meus dados, pelos papos sempre calmos. Obrigada pela leitura crítica da minha tese. Aos meus amigos, em especial Bruna (minha super parceira), Ana, Anderson, Andréa, Marcela (minha eterna “cat”), Gui Loriato (pelos papos sobre petrogênese das nossas rochas e por ter me mostrado como modelar minhas amostras) e mais um monte de gente que sempre esbarrou comigo pelos corredores da UERJ querendo saber como eu estava e oferecendo um ombro amigo (porque, meu amigo, essa tese foi sofrida). A cada um de vocês, eu desejo sempre muito sucesso e muita geologia.

Um agradecimento *super, hiper* especial ao queridíssimo Olav Eklund (*kiitos*), da Universidade de Turku (Finlândia), o cara que no final das contas abriu meus olhos e me fez expandir meus horizontes, que me mostrou novas possibilidades e me fez ir além. Agradeço pela paciência e pelos sorrisos.

O importante não é vencer todos os dias, mas lutar sempre.

Waldemar Valle Martins

RESUMO

NOGUEIRA, Camila Cardoso. *Petrogênese da Suíte Intrusiva Santa Clara com base em litogeoquímica, geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Lu-Hf: registro de magmatismo rapakivítico no SW do Cráton Amazônico*. 2016. 158 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

A Suíte Intrusiva Santa Clara é uma das sete suítes intrusivas que fazem parte da Província Estanífera de Rondônia, localizada na porção SW do Cráton Amazônico. Dados recentes mostram que esta suíte compreende um total de dezessete corpos intrusivos: Santa Clara, Oriente Novo, Oriente Velho, Jacundá, Massaranduba, Retiro, Moisés, Manteiga, Primavera, Montenegro, Jararaca e Jatuarana, além de outros mapeados apenas através de dados de aerogeofísica. Os dados acerca desta suíte intrusiva são relativamente escassos e alguns de seus corpos não haviam sido mapeados até o momento. Nesta tese de doutorado, onze dos dezessete maciços intrusivos da Suíte Intrusiva Santa Clara foram mapeados, amostrados e analisados, gerando dados inéditos. Os litotipos desta suíte são intrusivos em gnaisses ortoderivados, gnaisses paraderivados e granitoides do Complexo Jamari. As características de campo, petrográfica e litogeoquímica permitiram agrupar os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara em anfibólio-biotita quartzo-monzonitos e biotita granitos. Os anfibólio-biotita quartzo-monzonitos apresentam granulação média a grossa, textura porfirítica e exibem feições típicas de rochas produzidas por processo de mistura magmática e hibridização, como a presença de *clots* máficos surmicáceos, também conhecidos como MME (*mafíc microgranular enclave*), feições indicativas de resfriamento rápido como cristais de apatita acicular, evidências de desequilíbrio mineral e textura rapakivi. Já os biotita granitos possuem granulação média e textura que varia de porfirítica a equigranular; são rochas relativamente homogêneas, sem evidências de hibridização. As rochas do grupo de anfibólio-biotita quartzo-monzonitos são mais enriquecidas em Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, TiO₂, P₂O₅, Ba, Sr, Zr, V e Sc quando comparadas aos biotita granitos. Os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara são subalcalinos, metaluminosos a fracamente peraluminosos e exibem características geoquímicas compatíveis com aquelas esperadas para granitos tipo-A. Os litotipos analisados possuem características típicas de granitos tipo-A “ferroan”, são alcali-cálcicos e calci-alcálcicos e o grupo de quartzo-monzonitos apresenta caráter mais oxidado quando comparado com o grupo de biotita granitos, que são moderadamente reduzidos. Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos sugerem que os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara são típicos de ambiente intraplaca, do tipo-A₂, isto é, associados a ambientes pós-colisionais/pós-orogênicos. Datações U-Pb LA-ICP-MS obtidas em amostras da Suíte Intrusiva Santa Clara sugerem magmatismo entre 1061±11 Ma e 1099±17 Ma, com idades discrepantes para os Maciços Jatuarana (1126±7 Ma) e Jararaca (1138±16 Ma e 1123±13 Ma), que podem na realidade não fazer parte da Suíte Intrusiva Santa Clara, e talvez devessem ser separados da suíte. As análises de Lu-Hf LA-ICP-MS *in situ* em zircão revelam que as amostras de anfibólio-biotita quartzo-monzonitos exibem valores negativos e positivos de ϵ_{Hf} , indicando mistura de fontes. As análises também mostram que os grãos com ϵ_{Hf} negativos possuem idades T_{DM} arquenias a paleoproterozoicas, indo de 2,54 Ga a 1,84 Ga. Os grãos com ϵ_{Hf} positivos têm idades T_{DM} paleoproterozoicas a mesoproterozoicas, em intervalo entre 1,77 Ga e 1,31 Ga. Os dados apresentados neste tese de doutorado sugerem que os quartzo-monzonitos representem rochas híbridas, resultantes da mistura magmática entre um componente máfico injetado em câmara magmática onde um componente félsico estava sendo

cristalizado. A autora sugere que um processo de *underplating* máfico tenha ocorrido nos estágios finais da Orogênese Nova Brasilândia e que este magma teria levado à fusão parcial de crosta inferior, gerando *melt* de composição félsica. Este magmatismo félsico seria representado pelos litotipos do grupo de biotita granitos, que de maneira geral não exibem evidências de mistura magmática. Já os litotipos do grupo de anfibólio-biotita quartzo-monzonitos representariam rochas formadas a partir da mistura entre magma básico retido abaixo da crosta com *melt* félsico de origem crustal.

Palavras-chave: Petrologia. Geoquímica. Granitos rapakivi. Mistura magmática. Rapakivi. Cráton Amazônico.

ABSTRACT

NOGUEIRA, Camila Cardoso. *Petrogenesis of the Santa Clara Intrusive Suite based on litho geochemistry, U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope geochemistry: rapakivi magmatism in the SW Amazonian Craton*. 2016. 158 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The Santa Clara Intrusive Suite is one of the seven intrusive suites that comprise the Rondônia Tin province, in the SW Amazonian Craton. Recent studies have considered that this suite is composed of seventeen bodies: Santa Clara, Oriente Novo, Oriente Velho, Jacundá, Massaranduba, Retiro, Moisés, Manteiga, Primavera, Montenegro, Jararaca, Jatuarana and other intrusive bodies with no geological data so far. In this thesis, eleven of these intrusive massifs were studied and new unpublished geological data are presented. The rocks of the Santa Clara Intrusive Suite are intrusive in orthogneisses, paragneisses and granitoids from the Jamari Complex. The studied lithotypes were grouped in amphibole-biotite quartz-monzonites and biotite granites. The amphibole-biotite quartz-monzonites are porphyritic medium to coarse grained rocks and show some features compatible with magma mixing, such as the presence of mafic clots (also known as mafic microgranular enclave, MME), needle-like apatite, evidence of mineral disequilibrium and rapakivi texture. The porphyritic to equigranular biotite granites are medium-grained rocks and show no evidence of magma mixing. The quartz-monzonites are enriched in Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 , Ba, Sr, Zr, V and Sc when compared to the biotite granites. The rocks of the Santa Clara Intrusive Suite are subalkaline, metaluminous to slightly peraluminous in character and show geochemical characteristics compatible with A-type granites. These are ferroan A-type, alkali-calcic to calc-alkalic granites; the quartz-monzonites have an oxidized nature and the biotite granites are slightly reduced. The rocks of the Santa Clara Intrusive Suite are A_2 -type within-plate granites, which are associated with post-collisional/post-orogenic tectonic settings. U-Pb LA-ICP-MS data suggest magmatism ranging from 1061 ± 11 Ma to 1099 ± 17 Ma, with some very different ages for the Jatuarana (1126 ± 7 Ma) and Jararaca (1138 ± 16 Ma e 1123 ± 13 Ma) massifs, which could actually represent older igneous intrusive bodies and therefore should be separated from the Santa Clara Intrusive Suite. Lu-Hf LA-ICP-MS analysis reveal that the quartz-monzonites show evidence of mixing from two different sources, since they have both positive and negative ϵ_{Hf} values. The T_{DM} ages are at least 180 Ma younger for the grains with positive ϵ_{Hf} values when compared to the grains with negative ϵ_{Hf} values. The data presented in this thesis suggest that the quartz-monzonites represent hybrid rocks generated through mixing process between a mafic end member which was injected in a magmatic chamber with a felsic component. The author considers that a mafic underplating took place during the final stages of the Nova Brasilândia Orogenesis and this underplating would be responsible for melting the lower crust, generating a felsic melt. The crystallization of this felsic melt would result in the homogeneous biotite granites

Keywords: Petrogenesis. Geochemistry. A-type granites. Anorogenic granites. Rapakivi. Amazonian Craton.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização das cidades de Cujubim, Ariquemes e Machadinho D'Oeste em relação à capital Porto Velho, no estado de Rondônia.....	20
Figura 2 -	Mapa com a distribuição das suítes intrusivas que fazem parte da Província Estanífera de Rondônia.....	24
Figura 3 -	Mapa geológico com a localização de todos os maciços que compreendem a Suíte Intrusiva Santa Clara.....	31
Figura 4 -	Exemplos de aspecto macroscópico e mesoscópico dos litotipos que representam o grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos.....	46
Figura 5 -	Fotomicrografias referentes a litotipos do grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos.....	48
Figura 6 -	Fotomicrografias de litotipos do grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos mostrando reações de desequilíbrio entre biotita e anfibólio (A,B) e aspecto “rasgado” dos cristais de biotita (C,D). É comum a inclusão de cristais tardios de apatita nos minerais máficos como biotita e anfibólio. Este mineral ocorre na forma de cristais aciculares e na forma de cristais hexagonais (E,F).....	49
Figura 7 -	Fotos de afloramentos referentes aos litotipos do grupo de biotita granitos.....	51
Figura 8 -	Fotomicrografias referentes aos litotipos do grupo de biotita granitos porfiríticos e equigranulares; nicois paralelos na coluna à direita e nicois cruzados na coluna à esquerda.....	53
Figura 9 -	Diagrama ternário de classificação modal para rochas plutônicas com mais de 10% de quartzo normativo, caso das rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	60
Figura 10 -	Diagramas de caracterização química para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara (a) Diagrama K_2O+Na_2O vs. SiO_2 ; (b) $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ mol vs. $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ mol (índice de Shand); (c) Na_2O+K_2O vs. SiO_2	62
Figura 11 -	Diagramas bivariantes para óxidos maiores com a SiO_2 como índice de diferenciação para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	64

Figura 12 - Diagramas bivariantes para elementos-traço com SiO ₂ como índice de diferenciação para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	65
Figura 13 - Diagramas multielementares para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara normalizados em relação à crosta continental.....	66
Figura 14 - Diagramas Eu/Eu* vs. Sr e Rb/Ba vs; Rb/Sr para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara, mostrando a importância do fracionamento de K-feldspato nas rochas o grupo de biotita granitos.....	67
Figura 15 - Diagrama ternário Rb-Ba-Sr proposto por Bouseily and Sokkari (1975) para reconhecimento de <i>trends</i> de diferenciação em rochas ácidas.....	68
Figura 16 - Diagramas com padrões de ETR para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara com superposição de todas as amostras analisadas e ambos grupos de rochas em separado.....	69
Figura 17 - Diagramas para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara (a) FeO _t /(FeO _t + MgO) vs. SiO ₂ ; em comparação com campos para granitos cordilheiranos e granitos tipo-A; (b) (Na ₂ O+K ₂ O-CaO) vs. SiO ₂ (MALI), em comparação com campos para granitos tipo-A e granitos tipo-I.....	70
Figura 18 - Diagramas de comparação entre as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara e granitos à magnetita americanos (campo em vermelho), granitoides da Serra dos Carajás (campo em verde) e da Suíte Velho Guilherme (campo em amarelo) de Dall’Agnol & Oliveira (2007).....	72
Figura 19 - Diagramas (a) CaO/(FeO _t +MgO+TiO ₂) vs. (CaO+Al ₂ O ₃); (b) CaO/(FeO _t +MgO+TiO ₂) vs. Al ₂ O ₃ ; (c) FeO _t /(FeO _t +MgO) vs. Al ₂ O ₃ ; (d) FeO _t /(FeO _t +MgO) vs. Al ₂ O ₃ /(K ₂ O/Na ₂ O) para as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara analisadas, em comparação com campos para granitos cálcio-alcalinos e granitos tipo-A.....	74
Figura 20 - Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos para os quartzo monzonitos (anfíbólio-biotita granitos) e granitos (biotita granitos) da Suíte Intrusiva Santa Clara, confirmando seu caráter intraplaca.....	75
Figura 21 - Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos para os granitoides analisados nesta dissertação.....	76
Figura 22 - Diagramas propostos por Eby (1992) para classificação de granioides tipo-A (a) Y/Nb vs. Rb/Nb; (b) Y/Nb vs. Sc;Nb; (c) diagrama ternário Y-Nb-Ce; (d) diagrama ternário Y-Nb-3Ga para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa	

Clara.....	78
Figura 23 - Prancha com fotos de MEV de grãos de zircão que fazem parte do grupo de anfibólio-biotita quartzo-monzonitos.....	80
Figura 24 - Diagrama concórdia para a amostra de anfibólio-biotita quartzo-monzonito da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	81
Figura 25 - Diagrama concórdia para a amostra de anfibólio-biotita quartzo-monzonito da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	83
Figura 26 - Prancha com fotos de MEV de grãos de zircão que fazem parte do grupo de biotita granitos analisados para datação U-Pb LA-ICP-MS.....	84
Figura 27 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-MT-08B, do Maciço Montenegro, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	85
Figura 28 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-JT-01D, do Maciço Jatuarana, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	87
Figura 29 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-JT-05B, do Maciço Jatuarana, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	89
Figura 30 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-JT-06, do Maciço Jatuarana, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	90
Figura 31 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-RT-13B, do Maciço Retiro, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	92
Figura 32 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-JC-03B, do Maciço Jararaca, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	93
Figura 33 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-JC-07B, do Maciço Jararaca, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	95
Figura 34 - Diagrama concórdia para a amostra de biotita granito CN-MG-05C, do Maciço Manteiga, Suíte Intrusiva Santa Clara.....	96
Figura 35 - Gráfico ϵ_{Hf} vs. Idades de cristalização (Ma) para todas as amostras da Suíte Intrusiva Santa Clara analisadas neste estudo.....	97
Figura 36 - Diagramas bivariantes com SiO_2 (%) como índice de diferenciação para amostras da Formação Nova Floresta (Romanini, 2001) e os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara analisados nesta tese de doutorado.....	101
Figura 37 - Planilha de modelagem geoquímica para testes de mistura magmática entre amostra da Formação Nova Floresta (SJ-2096) e amostras da Suíte Intrusiva Santa Clara (biotita granito SC-19A e anfibólio-biotita quartzo-monzonito	

	CN-MT-03C).....	112
Figura 38 -	Planilha de modelagem geoquímica para testes de mistura magmática entre amostra da Formação Nova Floresta (SJ-2096) e amostras da Suíte Intrusiva Santa Clara (bioita granito SC-19A e anfibólio-biotita quartzo-monzonito CN-MT-03B).....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resumo de informações de campo e quantidade de amostras coletadas para análise petrográfica, litogeoquímica e geocronológica para cada um dos maciços da Suíte Intrusiva Santa Clara estudados neste doutorado. As amostras do Maciço Santa Clara são aquelas analisadas por Nogueira (2010, 2012).....	19
Tabela 2 -	Valores calculados de minerais normativos, mínimos e máximos para as amostras do grupo de anfibólio-biotita granitos da Suíte Intrusiva Santa Clara. Todos os valores são expressos em %peso.....	57
Tabela 3 -	Valores calculados de minerais normativos, mínimos e máximos para as amostras do grupo de biotita granitos da Suíte Intrusiva Santa Clara. Todos os valores são expressos em %peso.....	58
Tabela 4 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-MT-03C, obtidos no Multilab (UERJ).....	81
Tabela 5 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-MT-06C, obtidos no Multilab (UERJ).....	82
Tabela 6 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-MT-08B, obtidos no Multilab (UERJ).....	85
Tabela 7 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-JT-01D, obtidos no Multilab (UERJ).....	86
Tabela 8 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-JT-05B, obtidos no Multilab (UERJ).....	88
Tabela 9 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-JT-06, obtidos no Multilab (UERJ).....	90
Tabela 10 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-RT-13B, obtidos no Multilab (UERJ).....	91
Tabela 11 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-JC-03B, obtidos no Multilab (UERJ).....	93
Tabela 12 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-JC-07B, obtidos no Multilab (UERJ).....	94
Tabela 13 -	Dados isotópicos U-Th-Pb LA-ICP-MS da amostra CN-MG-05C, obtidos	

	no Multilab (UERJ).....	96
Tabela 14 -	Dados de Lu-Hf LA-ICP-MS dos grãos de zircão das amostras de quartzo-monzonitos da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	97
Tabela 15 -	Dados de Lu-Hf LA-ICP-MS dos grãos de zircão das amostras de biotita granitos da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	98
Tabela 16 -	Dados de Lu-Hf LA-ICP-MS dos grãos de zircão das amostras de biotita granitos da Suíte Intrusiva Santa Clara.....	100
Tabela 17 -	Resumo das principais características de campo, petrográficas, geoquímicas e isotópicas dos corpos intrusivos da Suíte Intrusiva Santa Clara estudados neste trabalho.....	108

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	GEOLOGIA REGIONAL	21
1.1	Evolução Geotectônica	21
1.2	Província Estanífera de Rondônia	23
1.2.1	<u>Suíte Intrusiva Serra da Providência</u>	24
1.2.2	<u>Suíte Intrusiva Santo Antônio</u>	26
1.2.3	<u>Suíte Intrusiva Teotônio</u>	27
1.2.4	<u>Suíte Intrusiva Alto Candeias</u>	27
1.2.5	<u>Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas</u>	29
1.2.6	<u>Suíte Intrusiva Santa Clara</u>	29
1.2.7	<u>Suíte Intrusiva Rondônia</u>	33
2	PETROLOGIA DE GRANITOS RPAKIVI	35
2.1	Histórico	37
2.2	Características	37
2.3	Geração da textura rapakivi	40
3	ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRAFIA	44
3.1	Introdução	44
3.2	Anfibólio-biotita granitos porfiríticos	44
3.3	Biotita granitos porfiríticos e equigranulares	50
4	LITOGEOQUÍMICA	54
4.1	Introdução	54
4.2	Discriminação de Séries, Suítes e Classificações dos Litotipos	55
4.3	Geoquímica Multielementar	63
4.4	Fontes e Ambientes Tectônicos	70
5	GEOCRONOLOGIA E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA	79
5.1	Introdução	79
5.2	Apresentação e Interpretação dos dados de U-Pb	79
5.3	Apresentação e Interpretação dos dados de Lu-Hf	98
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	102
6.1	A Suíte Intrusiva Santa Clara: uma revisão	102

6.2	A Suíte Intrusiva Santa Clara: uma nova proposta.....	104
6.3	A Suíte Intrusiva Santa Clara: ambiente geotectônico.....	116
	REFERÊNCIAS.....	118
	APÊNDICE A – Materiais e métodos.....	128
	APÊNDICE B – Mapa de amostragem litogeoquímica.....	149
	APÊNDICE C – Tabelas de análises para litogeoquímica.....	150
	APÊNDICE D – Mapa de amostragem para geocronologia e geoquímica isotópica.	158

INTRODUÇÃO

Esta tese de doutorado é requisito parcial para a obtenção do grau de doutor no Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara são objeto de estudo desta tese de doutorado. Esta suíte, localizada no estado de Rondônia, já foi estudada pela autora em seu trabalho de conclusão de curso de graduação e mestrado. Nesta tese, a autora expande a área de estudo, englobando onze dos dezessete corpos que fazem parte da Suíte Intrusiva Santa Clara. Os litotipos observados em campo foram analisados e a suíte é caracterizada em termos de aspectos de campo, petrografia, litogeoquímica, geocronologia e geoquímica isotópica. A autora propõe um novo modelo petrogenético para as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara e apresenta dados inéditos de corpos que não haviam sido estudados até o momento.

Esta tese de doutorado foi desenvolvida sob orientação do Prof. Dr. Mauro César Geraldês e sob a co-orientação da Prof^a. Dr^a. Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron, ambos professores adjuntos do Departamento de Geologia Regional e Geotectônica da Faculdade de Geologia (FGEL) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Apresentação do Tema e Objetivos

A Suíte Intrusiva Santa Clara fica localizada na porção sudoeste do Cráton Amazônico, uma das maiores e menos conhecidas áreas cratônicas do mundo. Em conjunto com outras seis suítes intrusivas, integra a chamada Província Estanífera de Rondônia, responsável por grande parte da produção de cassiterita no Brasil entre as décadas de 1960 e 1980. Os corpos de granitos estaníferos são caracterizados por química compatível com magmatismo tipo-A pós-colisional/pós-orogênico associado a diversos ciclos orogênicos que afetaram o SW do Cráton Amazônico.

Em ordem cronológica, este magmatismo granítico inclui a Suíte Serra da Providência (1606-1532 Ma), Suíte Intrusiva Santo Antônio (1406 Ma), Suíte Intrusiva Teotônio (1387 Ma), Suíte Intrusiva Alto Candeias (1346-1338 Ma), Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas (1314-1309 Ma), Suíte Intrusiva Santa Clara (1082-1074 Ma) e Suíte Intrusiva Rondônia (998-991 Ma) (Bettencourt et al. 1999). No nível de conhecimento atual, depósitos de Sn-polimetálico ocorrem associados às quatro suítes intrusivas mais jovens. Estas sete suítes

intrusivas intrudiram um embasamento composto por uma associação heterogênea de rochas polideformadas e metamorfisadas em grau médio a alto que compreende migmatitos, gnaisses, granitos, anfibolitos e granulitos.

A Suíte Intrusiva Santa Clara foi anteriormente estudada por Bettencourt et al. (1997, 1999), Leite Júnior (1992, 2002), Leite Júnior et al. (2008), Nogueira (2010, 2012), Quadros et al. (2011) e Nogueira et al. (2013). Os estudos conduzidos por Leite Júnior (1992, 2002) foram de maior detalhe porém tiveram como foco a mineralização polimetálica observada em alguns corpos da suíte. Os estudos realizados por Nogueira (2010, 2012) concentraram-se apenas na caracterização do Maciço Santa Clara, o de maior expressão da suíte em termos de área. Assim, esta tese de doutorado traz uma importante contribuição para o mapeamento da Suíte Intrusiva Santa Clara, já que alguns de seus corpos não haviam sido amostrados até o momento. Além disso, a autora propõe uma nova interpretação de dados e faz aqui uma nova proposta de petrogênese dos litotipos que compreendem a suíte.

Etapas de trabalho

A fim de alcançar os objetivos propostos para esta tese de doutorado, o método de trabalho consistiu em diversas etapas e contou com ferramentas bastante utilizadas pela comunidade científica. A seguir, uma breve descrição de tais métodos é feita; um texto mais detalhado sobre os procedimentos e as técnicas analíticas empregadas encontra-se em separado, no Anexo A.

1. Levantamento bibliográfico acerca da geologia, petrologia e geocronologia de granitos onde a textura rapakivi é uma característica importante;
2. Levantamento cartográfico desenvolvido ao longo de trabalho de campo em escala 1:250.000 observando-se características como textura, estruturas e composições de cada uma das fácies descritas em campo, com coleta de amostras para confecção de lâminas delgadas. Neste sentido, dois trabalhos de campo foram feitos, cada qual concentrando-se em uma porção da Suíte Intrusiva Santa Clara;
3. Análise petrográfica das amostras selecionadas em campo;
4. Seleção e preparação de amostras representativas de cada fácies para análise litogeoquímica;
5. Interpretação dos dados de litogeoquímica;
6. Seleção e preparação das amostras para análises U-Pb e Lu-Hf;

7. Integração dos dados e proposição de modelos petrogenéticos adequados para a área de estudo;
8. Elaboração desta tese de doutorado.

Os trabalhos de campo foram realizados tendo como base cartográfica a Folha Rio Machadinho (SC.20-X-C) em escala 1:250 000 e informações geológicas coletadas e publicadas por Quadros et al. (2011).

Localização da Área

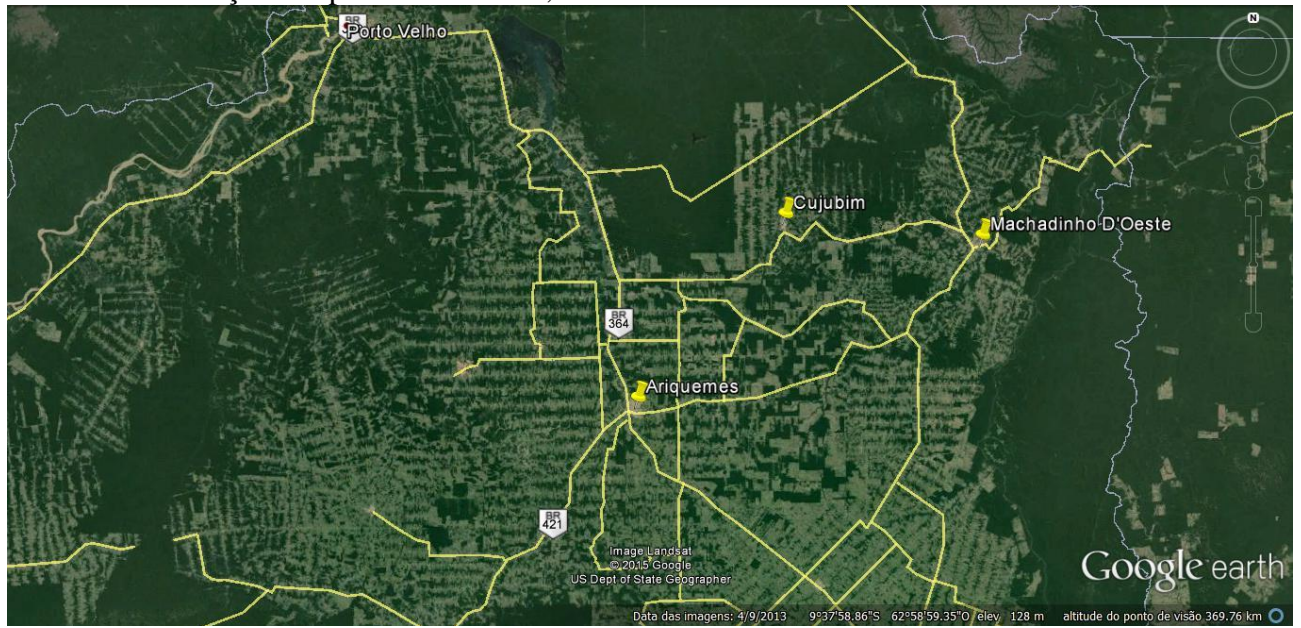
Dois trabalhos de campo foram realizados ao longo deste projeto de doutorado. O primeiro, entre os dias 29 de setembro e 5 de outubro de 2013, teve como base logística a cidade de Ariquemes, localizada na porção centro-norte do Estado de Rondônia, a cerca de 200 Km da capital Porto Velho. Esta primeira etapa teve como objetivo fazer o reconhecimento de campo e amostragem dos maciços Retiro, Montenegro, Jatuarana, Jararaca e Manteiga, localizados na porção sul da Suíte Intrusiva Santa Clara (Apêndice B). O acesso à Ariquemes se dá através da BR-364 saindo de Porto Velho. O segundo trabalho de campo foi realizado entre os dias 10 e 19 de junho de 2014 e teve como base logística as cidades de Cujubim e Machadinho d'Oeste, localizadas na porção nordeste do Estado de Rondônia. As cidades distam, respectivamente, cerca de 160 e 400 quilômetros da capital Porto Velho, e o acesso à estas se dá através da RO-205, saindo da BR-364. Nesta segunda etapa de campo, foram amostrados litotipos dos maciços Ramos, Preto, Oriente Velho, Oriente Novo e Primavera, localizados na porção central e norte da Suíte Intrusiva Santa Clara (Apêndice B). A tabela 1 abaixo resume informações de campo e quantidade de amostras coletadas para petrografia, litogeoquímica e geocronologia para a Suíte Intrusiva Santa Clara.

Tabela 1 – Resumo de informações de campo e quantidade de amostras coletadas para análise petrográfica, litogeoquímica e geocronológica para cada um dos maciços da Suíte Intrusiva Santa Clara estudados neste doutorado. Todas as amostras do Maciço Santa Clara são aquelas analisadas por Nogueira (2010; 2012).

Nome do Maciço	Quantidade de pontos	Dimensões aproximadas do corpo	Amostras para análise petrográfica	Amostras para análise litogeoquímica	Amostras para análise isotópica
Maciço Santa Clara	52	35 x 17,5 km	40	26	2 (U-Pb);10 (Sm-Nd)
Maciço Retiro	17	11 x 7,5 km	21	13	2 (U-Pb), 1 (Lu-Hf)
Maciço Jatuarana	6	7,5 x 7,5 km	15	8	3 (U-Pb), 2 (Lu-Hf)
Maciço Jararaca	7	7,5 x 7,5 km	10	8	2 (U-Pb e Lu-Hf)
Maciço Manteiga	6	7,5 x 5,5 km	6	2	1 (U-Pb)
Maciço Montenegro	9	9 x 7,5 km	14	12	3 (U-Pb e Lu-Hf)
Maciço Ramos	5	10 x 20 km	6	5	a ser analisado
Maciço Preto	1	5 x 10 km	1	1	a ser analisado
Maciço Oriente Velho	3	17,5 x 9 km	4	4	a ser analisado
Maciço Oriente Novo	4	20 x 25 km	6	7	a ser analisado
Maciço Primavera	2	2 x 2 km	2	2	a ser analisado
Total	112	----	125	88	13 (U-Pb), 8 (Lu-Hf), 10 (Sm-Nd)

Fonte: A autora, 2010; 2012.

Figura 1 – Localização das cidades de Cujubim, Ariquemes e Machadinho D'Oeste em relação à capital Porto Velho, no estado de Rondônia.



Fonte: Imagem retirada do Google Earth, 2016.

1 GEOLOGIA REGIONAL

A Suíte Intrusiva Santa Clara, cujos litotipos são objetos de estudo desta tese de doutorado, fica localizada na porção SW do Cráton Amazônico, no que seria a Província Geocronológica Rio Negro-Juruena de Tassinari e Macambira (1999) ou na Província Geotectônica Rondônia-Juruena de Santos et al. (2003). A Suíte Intrusiva Santa Clara compreende uma das sete suítes intrusivas que fazem parte da Província Estanífera de Rondônia, que será abordada em mais detalhes a seguir.

1.1 Evolução Geotectônica

A evolução geotectônica do sudoeste do Cráton Amazônico está relacionada à geração de dois arcos magmáticos que marcam o período acrescionário desta porção do cráton. O Arco Magmático Juruena predomina na parte leste e sudeste da área e é representado pelo Complexo Juruena (1,78-1,77 Ga), uma associação de rochas ortoderivadas como gnaisses tonalíticos, dioríticos e monzo/sienograníticos, com metagabros associados. Também no Paleoproterozoico, há uma outra associação de rochas ortoderivadas representada por gnaisses tonalíticos, enderbíticos e dioríticos, além de granito-gnáissicos monzo/sienograníticos, metatonalitos e metamáficas/granulitos máficos. Esta associação faz parte do Complexo Jamari, um conjunto de rochas que ocorre na porção mais ocidental da área e que teria sido formada durante a evolução do Arco Magmático Jamari, desenvolvido entre 1,76 e 1,74 Ga (QUADROS et al., 2011).

É importante ressaltar que há faixas irregulares e descontínuas de rochas paraderivadas de alto grau metamórfico que, ao que parece, “separam” os dois arcos magmáticos. Esta associação de rochas paraderivadas inclui sillimanita-granada-cordierita gnaisses, gnaisses calcissilicáticos, anfibolitos e migmatitos pelíticos que representam o Complexo Quatro Cachoeiras. Segundo Payolla et al. (2002), os protólitos sedimentares destas rochas teriam sido depositados em 1660 Ma no máximo. Dados disponíveis apontam para um evento colisional que teria afetado estes três pacotes de rochas no intervalo entre 1,69 e 1,63 Ga e que foi denominado Orogênese Quatro Cachoeiras (SANTOS et al., 2008). Os litotipos dos complexos Juruena, Jamari e Quatro Cachoeiras são intrudidos por diversos episódios de magmatismo granítico, sendo um deles

representado pela Suíte Intrusiva Serra da Providência. Esta suíte pós-orogênica a anorogênica desenvolveu-se em intervalo de tempo entre 1,57 e 1,50 Ga e corresponde a uma associação do tipo MCG (mangerito-charnockito-granito). Inclui monzogranitos com textura rapakivi bem desenvolvida, sendo piterlitos e viborgitos comuns, além de sienogranitos, charnockitos, mangeritos, quartzo-monzonitos e gabros. Dados demonstram que os litotipos desta suíte foram deformados e metamorfisados há cerca de 1,33 Ga durante a Orogenia Alto Candeias/Orogenia Rondoniana-San Ignacio (SCANDOLARA et al., 1999; SANTOS et al., 2002; QUADROS et al., 2011). Esta orogenia representa um evento colisional entre massas continentais com extensivo retrabalhamento crustal das rochas pré-existentes, ou seja, aquelas que fazem parte dos complexos Juruena, Jamari, Quatro Cachoeiras e das suítes intrusivas Itamarati e Serra da Providência (QUADROS et al., 2011).

Uma fase transpressional sinistral se seguiu à Orogenia Rondoniana-San Ignacio e é representada pelo Ciclo Sunsás/Orogênese Nova Brasilândia (1,1-1,6 Ga) que corresponde a um Ciclo de Wilson. Ao longo deste sistema transpressional, houve retrabalhamento das rochas dos complexos Jamari e Quatro Cachoeiras e das suítes Serra da Providência e Itamarati, além de também afetar os litotipos da Formação Igarapé Quinze. Ao final da Orogênese Nova Brasilândia, há cerca de 1,1 Ga, granitos anatéticos foram formados a partir da fusão de metassedimentos da Formação Igarapé Quinze, gerando assim as rochas que compreendem a Suíte Intrusiva Água Azul. Um magmatismo pós-orogênico de grande importância metalogenética foi gerado após a fase transpressional da Orogênese Nova Brasilândia, e é representado pelas rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara, com idades de aproximadamente 1,08 Ga. Um evento extensional pós-Sunsás (Esteniano/Toniano) levou à formação de uma bacia onde foram depositados sedimentos siliciclásticos da Formação Palmeiral de idade máxima de sedimentação de 1,02 Ga. Episódios magmáticos desta fase extensional são representados pelos granitos anorogênicos da Suíte Intrusiva Rondônia (0,98 Ga) que, assim como a Suíte Intrusiva Santa Clara, apresentam mineralizações de Sn, Nb, W e Ta, além de topázio. Além do magmatismo félsico granítico, há também registros de um magmatismo básico representado pelas rochas da Formação Nova Floresta (QUADROS et al., 2011). A intrusão dos granitos da Suíte Intrusiva Rondônia marca a cratonização da porção SW do Cráton Amazônico.

1.2 Província Estanífera de Rondônia

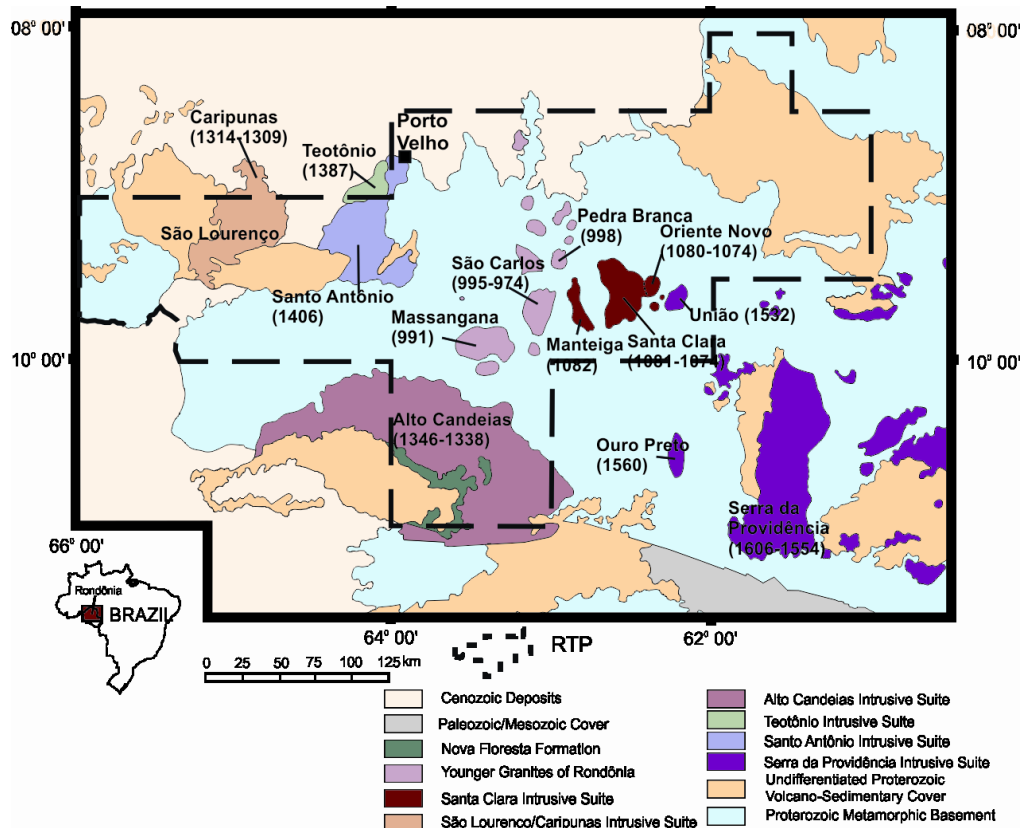
O embasamento da Província Estanífera de Rondônia e adjacências é constituído por uma associação heterogênea de rochas polideformadas e metamorfasadas em grau médio a alto que compreende migmatitos, gnaisses, granitos, anfibolitos e granulitos (QUADROS et al., 2011). Esta associação foi denominada Complexo Xingu por Leal et al. (1978) e Complexo Jamari por Isotta et al. (1978). Revisões posteriores acerca do Complexo Jamari incluíram algumas modificações (SCANDOLARA et al., 1999; RIZZOTTO et al., 2004; QUADROS & RIZZOTTO, 2007), incluindo neste complexo apenas ortognaisses tonalíticos e quartzo-dioríticos intercalados com lentes de enderbitos, gnaisses calcissilicáticos e raros anfibolitos. Os membros paraderivados passaram a constituir uma unidade litoestratigráfica denominada Suíte Metamórfica Quatro Cachoeiras. As idades de cristalização das rochas ígneas do Complexo Jamari variam entre 1,73 e 1,75 Ga, representando um dos episódios magmáticos mais antigos do estado de Rondônia (QUADROS et al., 2011). A deformação e o metamorfismo observados neste complexo estão relacionados à Orogenia Quatro Cachoeiras, com idades entre 1,67 e 1,63 Ga (SANTOS et al., 2008) e à Orogenia Candeias, de idades que variam entre 1,35 e 1,33 Ga (SANTOS et al., 2003; SANTOS et al., 2008). Entre 1,60 e 0,97 Ga, este embasamento foi intrudido por diversos episódios de magmatismo (BETTENCOURT et al., 2005).

O magmatismo granítico na região compreende um total de sete suítes intrusivas (Figura 2), sendo a textura rapakivi uma característica comum à maioria delas. Em termos de litologias, predominam os sienogranitos e monzogranitos, além de álcali-feldspato granitos nos Granitos Jovens de Rondônia. As variedades mais comuns são os porfiríticos e os equigranulares, com piterlitos subordinados e raras exposições de viborgitos (BETTENCOURT et al. 1999). Predominam os granitos rapakivi subalcalinos, metaluminosos a fracamente peraluminosos e geoquimicamente compatíveis com granitos tipo-A e intraplaca. Algumas suítes exibem também membros plutônicos como gabros, sienitos, charnockitos, mangeritos e alguns raros corpos de anortositos. Microgranitos, microsienitos, quartzo-feldspato pórfiros, riolitos, traquitos e alguns corpos de diabásio também foram descritos em algumas destas suítes (BETTENCOURT et al., 1999).

Em ordem cronológica, este magmatismo granítico inclui a Suíte Serra da Providência (1606-1532 Ma), Suíte Intrusiva Santo Antônio (1406 Ma), Suíte Intrusiva Teotônio (1387 Ma),

Suíte Intrusiva Alto Candeias (1346-1338 Ma), Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas (1314-1309 Ma), Suíte Intrusiva Santa Clara (1082-1074 Ma) e Suíte Intrusiva Rondônia (998-991 Ma) (Bettencourt et al. 1999). No nível de conhecimento atual, depósitos de Sn-polimetálico ocorrem associados às quatro suítes intrusivas mais jovens.

Figura 2 – Mapa com a distribuição das suítes intrusivas que fazem parte da Província Estanífera de Rondônia.



Fonte: BETTENCOURT et al. 1995a

1.2.1 Suíte Intrusiva Serra da Providência

A formalização do Granito Serra da Providência como unidade estratigráfica deve-se a Leal et al. (1976), que reconheceu intrusões com textura rapakivi aflorantes na serra de mesmo nome. Tassinari et al. (1984) passaram a denominar este corpo de Suíte Intrusiva Serra da Providência e Rizzotto et al. (1995) incluíram nesta unidade corpos de gabro, charnockito e mangerito, enquanto Bettencourt et al. (1995) acrescentaram à mesma o mangerito Maciço União e o charnockito de Ouro Preto. Scandolaro et al. (1999) incluíram também diversos stocks

deformados e intrusivos no Complexo Jamari, relacionando-os a esta suíte intrusiva. As rochas desta suíte têm ampla distribuição geográfica na porção centro-norte do Estado de Rondônia, principalmente entre o médio curso do rio Machado e o alto curso do rio Branco, onde compõem um batólito que sustenta a serra de mesmo nome, bem como na região de Machadinho d'Oeste e Ouro Preto d'Oeste, também como batólito e stocks isolados a leste e a oeste da Serra da Providência.

Rizzotto et al. (1995) observaram que o batólito Serra da Providência possui quatro fácies representadas por monzogranitos porfiríticos (piterlitos) com viborgitos associados, monzogranitos porfiríticos, monzogranitos pórfiros e sienogranitos granofíricos. As rochas deste batólito são intrusivas nos litotipos do Complexo Jamari, embora sejam raras as exposições de contato direto entre estes.

Os piterlitos compreendem hornblenda-biotita monzogranitos com fenocristais de álcali-feldspato rodeados por auréolas finas de cor cinza-esbranquiçada de plagioclásio. A presença de enclaves quartzo-dioríticos e feições de assimilação de dois magmas distintos são comuns. Os sienogranitos têm textura granofírica e cavidades preenchidas por quartzo e fluorita. Os monzogranitos porfiríticos possuem, em alguns locais, textura rapakivi. Segundo Scandolara et al. (2013), os granitos da Suíte Intrusiva Serra da Providência são geoquimicamente compatíveis com granitos tipo-A₂ de Eby (1992), e os charnockitos e quartzo mangeritos da suíte apresentam valores de FeO_T, MgO, CaO, Ba, Rb, Sr, Nb/Ta e Zr/Hf semelhantes aos dos granitos tipo-A anteriormente citados. De acordo com estes autores, o magma parental das rochas máficas que fazem parte da Suíte Intrusiva Serra da Providência seria resultado de fusão parcial de fontes mantélicas modificadas por processos de subducção, em um ambiente pós-colisional. Assim, o conjunto de granitos, charnockitos e quartzo mangeritos desta suíte intrusiva teria sido formado através da interação entre magmas mantélicos enriquecidos (em pequenas proporções) e crosta reciclada, em maiores proporções (BETTENCOURT et al., 1999; SCANDOLARA, 2006; SANTOS et al., 2008; SCANDOLARA et al., 2013).

Até o momento, o potencial mineral desta unidade reside em sua exploração com finalidade ornamental nas regiões de Machadinho d'Oeste, Cacoal e Ji-Paraná.

Seis amostras desta suíte intrusiva foram datadas segundo o método U-Pb (SHRIMP). As idades entre 1554 ± 47 Ma e 1606 ± 24 Ma obtidas sugerem que o batólito Serra da Providência

deve ter tido seu *emplacement* durante um período de pouco mais de 50 milhões de anos (BETTENCOURT et al., 1999).

1.2.2 Suíte Intrusiva Santo Antônio

Os primeiros registros de afloramentos de granitos na região da cachoeira Santo Antônio devem-se a Souza e Marques (1974), que os colocaram sob a denominação de Granito Porfiroblástico Santo Antônio. Trabalhos posteriores (ISOTTA et al., 1978; ADAMY & ROMANINI, 1990) descrevem a ocorrência de textura rapakivi (piterlitos e viborgitos), além de variedades porfiríticas e equigranulares, os quais receberam o nome de Granitos do tipo Serra da Providência (QUADROS e RIZZOTTO, 2007). Os corpos da Suíte Intrusiva Santo Antônio, juntamente com os corpos da Suíte Intrusiva Teotônio, formam o batólito Santo Antônio, na área noroeste da Província Estanífera de Rondônia (PAYOLLA, 1994). Esse batólito cobre uma área de aproximadamente 2.000 km², mas sua real dimensão é ainda desconhecida, já que seu domínio norte está coberto por sedimentos do Cenozoico da bacia Amazônica. Além disso, um espesso manto de intemperismo dificulta a visualização de afloramentos (QUADROS e RIZZOTTO, 2007).

Em termos de variedade litológica, Payolla (1994) descreve biotita monzogranito grosso equigranular a porfirítico, sienogranito com texturas rapakivi e anti-rapakivi, biotita monzogranito equigranular médio e quartzo-monzonito equigranular. Segundo o autor, diques pegmatíticos e aplíticos, rochas híbridas e diques de diabásio sin-plutônicos também ocorrem na suíte, caracterizando assim um magmatismo bimodal. Evidências de interação entre as variedades graníticas e magmas máficos são observadas, tais como a presença de megacristais ovais de plagioclásio com inclusões de quartzo, xenocristais de quartzo com coroas de anfibólio e enclaves monzodioríticos (QUADROS e RIZZOTTO, 2007).

Os granitoides da Suíte Intrusiva Santo Antônio são subsolvus, subalcalinos e metaluminosos a fracamente peraluminosos, são geoquimicamente compatíveis com granitos tipo-A (PAYOLLA, 1994), e mais especificamente do grupo A₂ (EBY, 1992). Já os diques de diabásio exibem características geoquímicas semelhantes a toleítos continentais, apesar de contaminados por componentes crustais. As rochas híbridas compreendem rochas intermediárias porfiríticas e do tipo brecha; representam monzogranitos, quartzo-monzonitos, quartzo-

monzodioritos e monzogranitos homogêneos. Feições como feldspatos manteados, cristais de quartzo arredondados (*quartz ocelli*), enclaves máficos microgranulares e as características geoquímicas confirmam a natureza híbrida destas rochas (BETTENCOURT et al. 1995).

Uma amostra de biotita sienogranito possui idade de 1406 ± 32 Ma (BETTENCOURT et al. 1999), com um alto grau de incerteza devido à discordância entre frações de grãos de zircão analisados.

1.2.3 Suíte Intrusiva Teotônio

As rochas da Suíte Intrusiva Teotônio ocupam uma pequena porção do noroeste de Rondônia e afloram ao longo das margens e no canal do rio Madeira. Não são observadas relações de contato entre as rochas desta suíte, do embasamento (Complexo Jamari) e das rochas da Suíte Intrusiva Santo Antônio (QUADROS e RIZZOTTO, 2007).

De acordo com Payolla (1994), os litotipos incluem microclínio granitos de granulação grossa, microclínio granitos bandados de granulação média, microclínio-quartzo sienitos e sienogranitos de granulação média a grossa. Corpos tabulares de microclínio sienitos e diques sin-plutônicos de diorito, monzodiorito e monzonito cortam os microclínio granitos. Feições típicas de mistura magmática tais como a presença de xenocristais de plagioclásio cálcico corroídos por álcali-feldspato e enclaves monzodioríticos microgranulares são também comuns. Em termos de geoquímica, esta suíte apresenta caráter alcalino; os sienitos e granitos são metaluminosos e compatíveis com granitos tipo-A (grupo A₁; EBY 1992) fanerozoicos.

Uma amostra de álcali-feldspato granito foi datada em 1387 ± 16 Ma (BETTENCOURT et al. 1999).

1.2.4 Suíte Intrusiva Alto Candeias

As rochas da Suíte Intrusiva Alto Candeias ocupam predominantemente no médio a alto curso dos rios Candeias, Jamari, Jaci-Paraná e Capivari; alguns corpos menores ocorrem também no extremo sudoeste de Rondônia. Predominam rochas porfíricas de granulação média a grossa, e rochas equigranulares, aplitos, sienitos e charnockitos ocorrem subordinados. A norte, no

contato com as rochas do Complexo Jamari, ocorrem protomilonitos e milonitos devido a uma zona de cisalhamento (QUADROS e RIZZOTTO, 2007).

Os principais litotipos compreendem hornblenda-biotita monzogranitos, biotita monzogranitos e quartzo-monzonitos, algumas vezes apresentando textura rapakivi (piterlitos). Amostras de rochas do batólito foram datadas em 1346 ± 5 Ma e 1338 ± 5 Ma (BETTENCOURT et al. 1999); estes resultados levam a crer que os corpos da Suíte Intrusiva Alto Candeias foram intrudidos durante um período de tempo relativamente curto.

Em estudo acerca do depósito Liberdade, localizado no município de Campo Novo (RO), Santos Jr. et al. (2011) descrevem mineralização de cassiterita e arsenopirita em sistemas de filões encaixados em rochas graníticas da Suíte Alto Candeias. Segundo os autores, o fluido responsável pela mineralização observada é de origem magmática e a idade $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 1308 ± 5 Ma obtida em muscovita de greisen deste depósito sugere que a mineralização de cassiterita e arsenopirita está associada à fase tardi a pós-magmática de corpos não aflorantes que fazem parte da Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas (1314-1309 Ma), que por sua vez intrudem rochas da Suíte Intrusiva Alto Candeias. No entanto, os dados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtidos por Santos Jr. et al. (2011) também são compatíveis com uma mineralização possivelmente associada à Suíte Intrusiva Alto Candeias, levando em consideração o tempo de resfriamento de uma intrusão das dimensões da SIAC.

Queiroz (2009) caracterizou litotipos da Suíte Intrusiva Alto Candeias e descreveu quatro tipos petrográficos: Unidade Monte Negro, composta predominantemente por granitos apresentando textura rapakivi; Unidade Buritis, constituída por rochas com maior porcentagem de minerais máficos, variando de granodioritos equigranulares a porfíricos; Unidade Campo Novo, composta por charnockitoides de granulação média a grossa e finalmente, Unidade Jacilândia, que compreende biotita granitos e quartzo granitoides, ambos de granulação fina. O litotipo biotita granito de granulação fina seria responsável pela mineralização de estanho observada na SIAC. A autora datou uma amostra desta unidade pelo método $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ por evaporação e os dados revelaram a idade de cristalização de 1348 ± 3 Ma. Assim, é possível que a mineralização de estanho descrita na área do distrito de Campo Novo esteja, de fato, associada à própria Suíte Intrusiva Alto Candeias, já que as idades são compatíveis.

1.2.5 Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas

As rochas que compõem a Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas na parte noroeste da Província Estanífera de Rondônia foram primeiramente descritas na região de São Lourenço por Kloosterman (1966), e na região de Caripunas por Bettencourt & Kaedei (1984). As rochas desta suíte intrusiva afloram na margem esquerda do rio Madeira, nas regiões de Mutum-Paraná, São Lourenço, Jirau, Caripunas e Fortaleza do Abunã. Em alguns locais as rochas desta suíte intrusiva encontram-se cobertas por arenitos e conglomerados da Formação Palmeiral (QUADROS e RIZZOTTO, 2007). A Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas compreende uma variedade de granitos rapakivi como piterlitos e raras exposições de viborgitos, além de granitos equigranulares a porfíricos, granitos pórfiros subvulcânicos, aplitos e quartzo-sienitos. Os membros porfíricos predominam e algumas vezes contem enclaves microgranulares de diorito. Em Caripunas as rochas desta suíte intrusiva são subsolvus a estão intensamente hidrotermalizadas, apresentando mineralização de cassiterita e wolframita em *greisen*, veios de quartzo e depósitos secundários. Esta mineralização ocorre associada aos biotita sienogranitos equigranulares e ortoclásio granitos (QUADROS e RIZZOTTO, 2007).

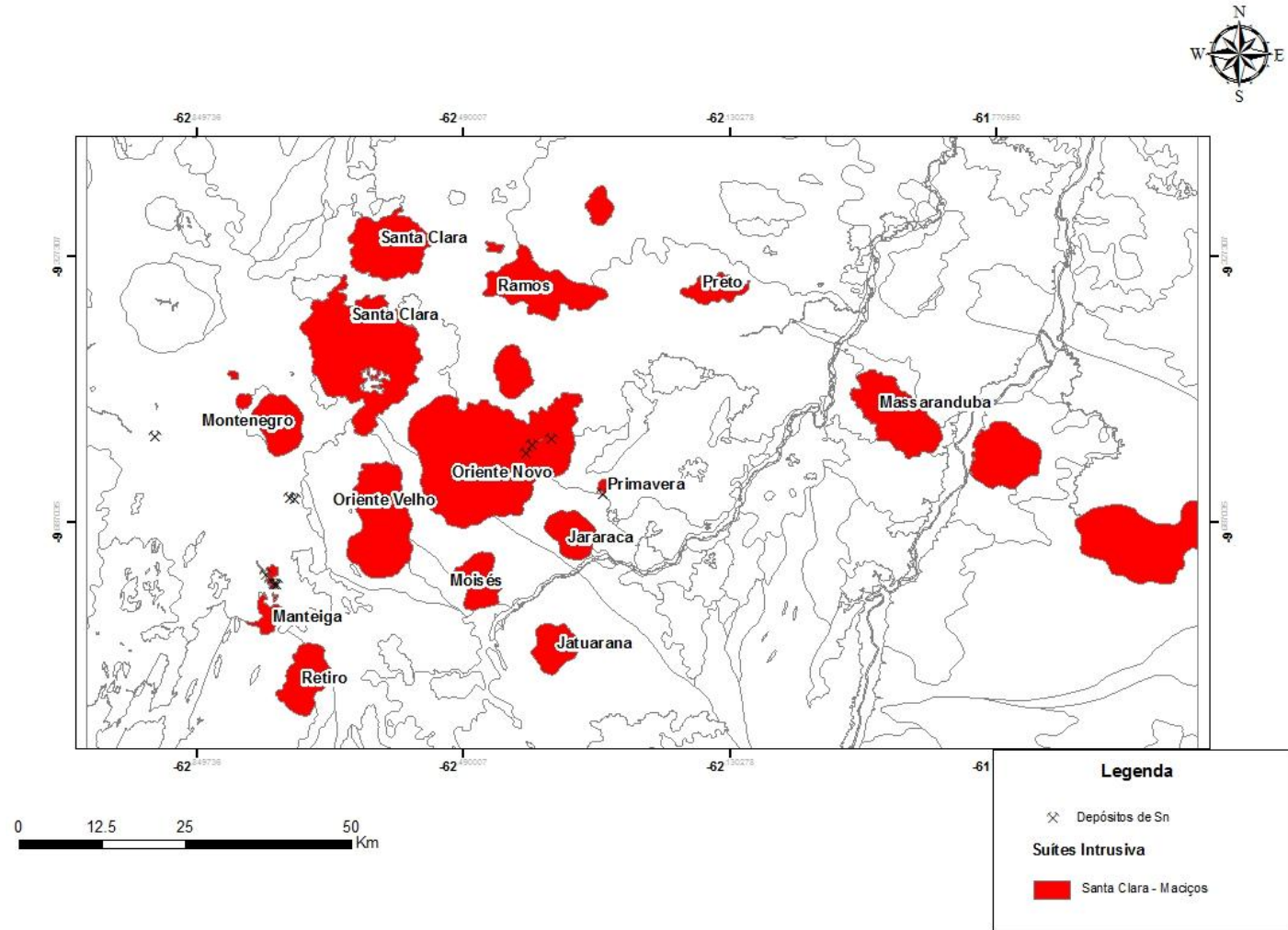
A maioria das rochas desta suíte é subalcalina de caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso, porém os ortoclásio granitos são peralcalinos (BETTENCOURT et al. 1997). Ainda de acordo com Quadros e Rizzotto (2007), este episódio magmático teria sido gerado nos estágios finais da Orogenia Rondoniana-San Ignacio ou Orogenia Alto Candeias.

1.2.6 Suíte Intrusiva Santa Clara

A nordeste de Santa Clara, Kloosterman (1968) descreveu rochas que reuniu sob a denominação de Complexo de Oriente com 8-10 km de diâmetro e que sustenta a serra de mesmo nome. Consiste de uma complexa mistura de biotita-granitos, microgranitos, quartzo-pórfiros e topázio-greisen. Bettencourt et al. (1997), com base em dados geocronológicos, agrupam os maciços graníticos de Santa Clara, Oriente Velho, Oriente Novo e Manteiga sob a denominação de Suíte Intrusiva Santa Clara. Posteriormente, Leite Júnior (2002) subdividiu o maciço Manteiga em dois: Manteiga-Sul e Manteiga-Norte, além de incluir na Suíte Intrusiva Santa Clara mais quatro maciços: Jararaca, Carmelo, Primavera e das Antas.

Dados mais recentes de campo, petrografia, geocronologia e sensoriamento remoto permitiram redefinir esta suíte, delimitando diversos corpos e maciços nas proximidades das cidades de Ariquemes, Cujubim, Machadinho d'Oeste e vale do Anari, todos interpretados como pertencentes à Suíte Intrusiva Santa Clara. Assim, um total de 17 maciços graníticos subcirculares a subalongados foram individualizados: Santa Clara, Oriente Novo, Oriente Velho, Jacundá, Massaranduba, Retiro, Moisés, Manteiga, Primavera, Montenegro, Jararaca e Jatuarana, dos quais três foram delimitados apenas com base em dados de aerogeofísica (QUADROS et al. 2011; Figura 3). Os demais corpos não possuem nome no mapeamento realizado pelos autores citados, porém durante os trabalhos de campo desenvolvidos no presente projeto dois destes maciços receberam nome: Maciço Ramos e Maciço Preto, nomes escolhidos devido a igarapés e rios próximos a estas intrusões, mantendo assim um significado regional. No entanto, nenhum afloramento foi observado no Maciço Preto.

Figura 3 - Mapa geológico com a localização de todos os maciços que compreendem a Suíte Intrusiva Santa Clara.



Fonte: QUADROS et al., 2011. Modificado pela autora, 2016.

As rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara são intrusivas nos ortognaisses do Complexo Jamari, nos paragnaisses do Complexo Quatro Cachoeiras e em granitoides da Suíte Intrusiva Serra da Providência, apesar de raramente serem observados contatos diretos em campo. Em termos de variedade litológica, esta suíte inclui granitoides rosados e acinzentados de granulação média a grossa variando de equigranulares a porfíricos, com textura rapakivi em alguns afloramentos. Compreendem álcali-feldspato granitos, hornblenda-biotita monzogranitos, biotita monzogranitos, biotita-hornblenda sienogranitos e biotita-quartzo monzonitos (QUADROS et al. 2011). Bettencourt et al. (1999) também descrevem albita granitos e álcali-feldspato sienitos. Diques de leucogranito, veios de quartzo e microgranito ocorrem localmente. Nogueira et al. (2013) descrevem a ocorrência de granitos porfíricos, equigranulares, finos e piterlíticos no Maciço Santa Clara, o maior dos maciços que constituem a Suíte Intrusiva Santa Clara.

Leite Júnior (2002) reconheceu dois tipos diferentes de associações na Suíte Intrusiva Santa Clara, nomeando-as de A1 e A2. As rochas da associação A1 compreendem quartzo-monzonitos, monzogranitos e sienogranitos, de composição intermediária a ácida e valores da razão $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ que variam entre 0,83 e 0,97. São rochas subalcalinas de alto-K, com valores de K_2O entre 4,65 e 5,94% em peso. O autor ainda subdivide as rochas da associação A1 em dois tipos: A1a e A1b. O subtipo A1a é predominante em área e possui caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso; o subtipo A1b possui caráter peraluminoso e compreende granitos com muscovita. As rochas da associação A1 também foram descritas por Nogueira et al. (2013) no Maciço Santa Clara, e a análise dos dados de litogeoquímica permitiram interpretá-las como granitos pós-colisionais gerados nos estágios finais do ciclo orogênico Sunsás (1,25-1,00 Ga), a partir da fusão de rochas crustais de composição quartzo-feldspática.

As rochas da associação A2 apresentam maior variedade de composições, variando de rochas básicas até membros de composição ácida. Leite Júnior (2002) também reconheceu dois subtipos para esta associação: A2a e A2b. A primeira compreende sienitos, microsienitos, microgranitos peralcalinos, traquitos e traquiandesitos, e possui caráter que varia entre metaluminoso e peralcalino. As rochas do subtipo A2b são granitos, alaskitos, riolitos e granitos com mica litífera, e possuem caráter peraluminoso.

Cinco amostras da Suíte Intrusiva Santa Clara foram datadas por Bettencourt et al. (1999), sendo três amostras da subsuíte subalcalina e duas amostras da subsuíte alcalina. Uma amostra de hornblenda-biotita monzonito da subsuíte subalcalina possui idade de cristalização de 1081 ± 50 Ma. Uma amostra de biotita granito porfírico da subsuíte alcalina tem idade de

1074±214 Ma. Mais recentemente, duas amostras da subsuíte subalcalina e pertencentes ao Maciço Santa Clara foram datadas por Nogueira (2012). Uma amostra da fácies porfirítica possui idade de 1075±16 Ma e uma amostra da fácies de granulação fina possui idade de 1061±11 Ma, ambas datadas pelo método U-Pb/LA-ICP-MS e interpretadas como idades de cristalização.

Aparentemente, a Suíte Intrusiva Santa Clara é a única representante de magmatismo intraplaca com idades entre 1,08 e 1,07 Ga na Província Estanífera de Rondônia e até mesmo no próprio Cráton Amazônico (DALL'AGNOL et al. 1999).

1.2.7 Suíte Intrusiva Rondônia

A Suíte Intrusiva Rondônia foi primeiramente descrita por Kloosterman (1967, 1968) sob a denominação de *Younger Granites of Rondônia* e incluiu na mesma uma série de vários corpos graníticos da área central da Província Estanífera de Rondônia. Priem et al. (1971) dataram diversas destas rochas dentro de uma isócrona Rb-Sr em 980 ± 20 Ma e Tassinari et al. (1984) inclui na Suíte Rondoniana todos os granitos com idade isocrônica Rb/Sr em rocha total de 997 ± 40 Ma. Bettencourt et al. (1999) excluem deste grupo rochas com idades superiores a 1000 Ma, redefinindo o nome desta suíte para Suíte Granitos Últimos de Rondônia e incluindo nela os maciços graníticos Ariquemes, Massangana, São Carlos, Caritianas, Pedra Branca, Santa Bárbara e Jacundá. Em um momento posterior, Rizzotto et al. (2004) redefiniram o nome desta suíte, chamando-a de Suíte Intrusiva Rondônia. Esta nomenclatura foi também adotada por Quadros e Rizzotto (2007) e mais recentemente por Quadros et al. (2011).

Os granitos deste complexo ocorrem como batólitos e *stocks* epizonais multifásicos, alojados segundo o controle de alinhamentos N-S e NE-SW, principalmente. Ocorrem sob forma subcircular, natureza tipicamente cratônica, de características subvulcânicas, e intrusivos nas rochas do Complexo Jamari e da Suíte Serra da Providência. As rochas desta suíte compreendem dois tipos principais: *subsolvus* subalcalinas e *hipersolvus* alcalinas, sendo que estas últimas são as mais jovens. A subsuíte subalcalina inclui sienogranitos equigranulares, monzogranitos porfiríticos e ortoclásio granitos, além de ocorrências de topázio-albita granitos e topázio-quartzo-feldspato pórfiros. Destes, os sienogranitos e monzogranitos exibem textura rapakivi. A subsuíte alcalina compreende ortoclásio-sienitos, microssienitos, ortoclásio-microgranitos e feldspato-quartzo pórfiros.

Estes granitos anorogênicos rapakivíticos têm sua geração relacionada aos eventos magmáticos associados à evolução do ciclo orogênico Sunsás-Aguapeí (TEIXEIRA et al. 1989). Dados geocronológicos indicam um magmatismo de curta duração restrito aos terrenos do Domínio Ariquemes-Porto Velho, possivelmente relacionado à movimentação final das transcorrências N-S e NE-SW, que limitam os complexos Jauru e Jamari.

Romanini (1982) *apud* Bettencourt & Dall'Agnol (1995) reconhece quatro fácies petrográficas no complexo granítico Massangana representadas pela fácies Massangana, de biotita granitos porfiríticos de granulação grossa, pela fácies São Domingos, composta por biotita granitos equigranulares de granulação média a grossa em alguns locais sendo porfiríticos e em outros exibindo granulação fina, pela fácies Bom Jardim, que compreende biotita granitos de granulação fina, média e grossa com poucos fenocristais de feldspato potássico, e finalmente pela fácies Taboca, composta por sienitos, quartzo-sienitos e quartzo-monzonitos. Segundo Bettencourt & Dall'Agnol (1995), rochas máficas também foram observadas próximo à área de ocorrência da fácies Taboca, e supõem que estas estejam relacionadas à evolução magmática do complexo Massangana, sugerindo uma associação bimodal.

Sparrenberger et al. (2002) descrevem três fácies *subsolvus* no Maciço Santa Bárbara, representadas por sienogranitos porfiríticos com textura viborgítica e caráter metaluminoso, albita-microclínio granitos equigranulares de caráter peraluminoso e albita-microclínio granitos piterlíticos, granitos equigranulares ou microporfiríticos, todos peraluminosos.

2 PETROLOGIA DE GRANITOS RAPAKIVI

Em finlandês, o termo *rapakivi* significa ‘rocha friável’ e até onde se tem registros, foi usado pela primeira vez em 1694 por Urban Hjärne (ESKOLA, 1930a, b), um químico, geólogo, médico e escritor sueco. A textura *rapakivi sensu stricto* (SEDERHOLM, 1891; VORMA, 1976), ou seja, da maneira como ocorre nos batólitos do Escudo Báltico, é caracterizada: (1) pelo formato ovoide de fenocristais de feldspato potássico, que tem em média 3-4 cm de diâmetro; (2) manteamento destes ovoides por finas coroas de oligoclásio-andesina, com espessuras que variam entre 1 e 3 mm; alguns ovoides, no entanto, permanecem sem esta coroa; (3) ocorrência de duas gerações de feldspato potássico e quartzo. Já a textura *rapakivi sensu lato* é definida apenas pela ocorrência de ovoides de feldspato potássico. Granitos *rapakivi sensu lato* compreendem tanto granitos anorogênicos quanto orogênicos de idades diferentes. É importante ressaltar que o termo *rapakivi* não traz consigo nenhum fator limitante em termos de idade; apenas caracteriza rochas com ocorrência de ovoides de feldspato potássico manteados por coroas de plagioclásio.

Quando a quantidade de ovoides manteados é maior do que aquela de não manteados, a textura *rapakivi* recebe o nome especial de **viborgítica**. Quando o contrário ocorre, isto é, a quantidade de ovoides não manteados é maior do que a de ovoides manteados, a textura recebe o nome de **piterlítica** (VORMA, 1976). De acordo com autores como Hackman (1934) e Sahama (1945), estes termos devem ser usados apenas no sentido textural, e não como tipos diferentes de magma. Em trabalhos de mapeamento do batólito Wiborg (SE Finlândia), Vormo (1971) descreve oito variedades diferentes de granitos *rapakivi*. Uma breve descrição acerca de cada uma destas texturas é dada a seguir.

O grupo I compreende granitos equigranulares de coloração escura (verde-escuro, cinza-escuro, quase preto) e granulação média a grossa. Exibe uma abundante quantidade de quartzo, plagioclásio e feldspato potássico; os silicatos máficos incluem hornblenda, biotita, fayalita e, em alguns casos, piroxênio. Rochas localmente denominadas *tirilitos* também ocorrem e consistem em um diabásio híbrido apresentando textura *rapakivi* e de composição granodiorítica. Os minerais mais comuns são andesina, microlina-pertita, hornblenda, biotita e piroxênio serpentinizado. O grupo II representa biotita-hornblenda granitos equigranulares de granulação grossa e fenocristais de feldspato potássico na maioria das vezes ovoides, porém estes ocorrem espalhados de maneira esparsa pela rocha. O grupo III compreende os famosos *viborgitos*, rochas com coloração que varia desde o quase preto até cores mais rosadas. São

granitos porfiríticos de granulação grossa com ovoides de feldspato potássico que possuem de 3 a 4 cm de diâmetro e cuja maioria exhibe coroas de plagioclásio com espessuras que variam entre 1 e 3 mm. Estes ovoides ocorrem em grande quantidade e são bem distribuídos. A mineralogia inclui feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, todos ocorrendo em duas gerações. Hornblenda e biotita são os silicatos máficos típicos. Uma variedade deste grupo de viborgitos inclui aqueles escuros que exibem esparsos ovoides de feldspato potássico, além de plagioclásio de coloração escura e zonado que ocorrem como grãos porfiríticos bem como grãos na matriz da rocha. Além da mineralogia citada anteriormente, esta variedade possui também fayalita, iddingsita e grunerita. Os conteúdos de plagioclásio e biotita são maiores nesta variedade e esta rocha é mais comum na zona de contato com as rochas encaixantes.

O grupo IV compreende os piterlitos, uma variedade texturalmente relacionada aos viborgitos; a diferença é que nos piterlitos, a maioria dos ovoides de feldspato potássico não exhibe as coroas de plagioclásio. Ainda em comparação com os viborgitos, estes possuem maiores quantidades de feldspato potássico, porém menores conteúdos de plagioclásio. A biotita é o silicato máfico predominante, e hornblenda é rara. No maciço Wiborg, observa-se uma transição gradativa entre as variedades viborgíticas e piterlíticas (WAHL, 1925; SIMONEN and VORMA, 1969). O grupo V é representado por granitos porfiríticos, rochas caracterizadas por abundantes fenocristais angulosos de feldspato potássico que variam entre 0,5 e 3 cm de diâmetro e não são manteados por coroas de plagioclásio. Em termos de mineralogia e composição química, estes granitos porfiríticos são muito semelhantes aos piterlitos; a diferença entre estas variedades é de fato textural: os fenocristais da fácies piterlítica tendem a ter formatos mais ovoides. O grupo VI compreende biotita granitos equigranulares de coloração que varia de avermelhada a cinzenta e granulação média a grossa. A mineralogia inclui feldspato potássico, quartzo e plagioclásio, além de biotita. Ocasionalmente, é possível observar ovoides de feldspato potássico espalhados pela rocha. Uma variedade importante neste grupo é representada por granitos equigranulares cinzentos que exibem topázio, sendo este mineral uma evidência de que o magma era enriquecido em voláteis, especialmente flúor.

O grupo VII é representado por pórfiro aplitos, um granito rapakivi de granulação média que exhibe ovoides de feldspato potássico manteados ou não, e distribuídos de maneira esparsa pela rocha. A mineralogia e a composição química destes aplitos são semelhantes àquelas dos piterlitos e granitos equigranulares anteriormente descritos. O oitavo e último grupo compreende rochas de diques: granitos pórfiros, aplitos pórfiros, aplitos e quartzo pórfiros. São mineralogicamente relacionadas aos biotita granitos equigranulares e cortam as

principais variedades de granitos rapakivi, bem como suas rochas encaixantes. Os quartzo pórfiros exibem fenocristais de feldspato potássico alinhados paralelamente aos contatos dos diques.

Algumas das variedades de granitos rapakivi descritas por Vorm (1971) também são observadas na Suíte Intrusiva Santa Clara, sendo estas as rochas dos grupos IV, V e VI deste autor.

2.1 Histórico

Na porção sul da Finlândia, granitos rapakivi vem sendo documentados e estudados pelas comunidades científicas da Suécia e Finlândia por aproximadamente 300 anos; no final do século XIX e início do século XX, granitos rapakivi foram descritos também na Ucrânia e Suécia. Durante o período pós Segunda Guerra Mundial, novos estudos foram realizados e novos corpos graníticos de textura rapakivi foram relatados. Ocorrências foram descritas nos países Bálticos, sul da Groelândia, Venezuela, Brasil, República da Botswana (África), oeste dos Estados Unidos e em outras áreas de escudos precambrianos (HAAPALA e RÄMÖ, 1999).

No ano de 1991 um novo projeto (IGCP-315) foi iniciado a fim de correlacionar granitos rapakivi e suas rochas associadas em escala global, incluindo também os países em desenvolvimento, onde os estudos ainda eram escassos. As principais atribuições do projeto estavam relacionadas ao estudo da distribuição espacial e temporal dos granitos rapakivi, seu ambiente tectônico e mecanismo de *emplacement*, relação com evolução crustal, caráter bimodal do magmatismo, petrografia e geoquímica, metalogenia, petrogênese, condições de cristalização e origem da textura rapakivi.

Ao longo dos seis anos de projeto, diversos simpósios, livros e artigos tiveram seu início e conclusão, auxiliando na compreensão dos mecanismos e condições que levam à geração de granitos rapakivi.

2.2 Características

A maior parte dos granitos rapakivi até então conhecida é de idade proterozoica, num *range* que vai de 1,0 a 1,8 Ga. No entanto, há corpos de granitos rapakivi de idade arqueana e fanerozoica. De acordo com Haapala e Rämö (1992), granitos rapakivi são “granitos tipo-A

caracterizados pela presença, pelo menos nos batólitos de maiores dimensões, de variedades de granito apresentando textura rapakivi”.

A associação magmática dos granitos rapakivi é comumente bimodal (máfico-félsico); rochas básicas como diabásio, gabro e anortosito podem ser encontradas em associação com riolitos, granitos e sienitos. Uma possível interação entre esses dois tipos de magma pode gerar, ainda que localmente, rochas intermediárias (HAAPALA e RÄMÖ, 1999).

Baseado nos dados geocronológicos disponíveis é possível correlacionar os diversos grupos de granitos rapakivi nas mais diversas áreas de escudos. O grupo de idades entre 1,54 e 1,58 Ga pode ser observado na Fenoscândia, Venezuela e Rondônia; os grupos entre 1,31 e 1,41 Ga e 1,02 e 1,08 Ga podem ser observados em Rondônia e nos Estados Unidos. Sadowsky e Bettencourt (1996) e Bettencourt et al. (1999) confirmam que tais dados podem, de fato, ser utilizados em reconstruções de paleocontinentes. É importante ressaltar que, como os dados geocronológicos atestam, os granitos rapakivi não foram gerados em um único grande evento, mas sim em diversos episódios de magmatismo que duraram do final do Arqueano até o Terciário, ainda que o maior destes episódios tenha ocorrido entre 1,8 e 1,0 Ga (HAAPALA e RÄMÖ, 1999). No entanto, é necessário esclarecer que há grupos de idades sem correlatos nos demais paleocontinentes. Este é o caso do pluton *Upper Paradise River* (1501 a 1495 Ma), na porção leste do paleocontinente *Laurentia*, que não possui qualquer correlato no Cráton Amazônico; também o magmatismo anorogênico na porção ocidental da Suécia e Noruega possui idade que diverge daquela encontrada e documentada para o magmatismo no Cráton Amazônico (BETTENCOURT et al., 1999).

Desde estudos de Bridgwater e Windley (1973), o rifteamento em estágios iniciais ou já em processo de abortamento tem sido considerado como o ambiente tectônico de diversas suítes de granitos anorogênicos. Observações de campo em complexos da Finlândia, China, Estados Unidos e Suécia confirmam que o magmatismo anorogênico destas áreas está relacionado à intrusão de diques, estruturas de *gráben*, afinamento crustal e falhamento lístrico, feições típicas de ambiente extensional. Na Suécia, os chamados granitóides *Dala* (1,68-1,79 Ga) estão relacionados a um processo de transição entre ambiente compressional e ambiente extensional.

Outro aspecto a ser considerado é a importância metalogenética dos álcali-granitos hospedeiros de topázio, que geralmente constituem a última fase intrusiva de complexos de granitos rapakivi (HAAPALA, 1995). Estes granitos mineralizados a topázio são diferentes dos granitos rapakivi, e suas características geoquímicas e mineralógicas são aquelas típicas às dos granitos mineralizados a estanho do Fanerozoico. Estudos petrológicos e geoquímicos

(e.g. HAPPALA, 1977, 1997; BETTENCOURT et al., 1999) mostram que os granitos mineralizados a topázio são petrogeneticamente associados com os granitos rapakivi.

A relação entre o magmatismo rapakivi e processos orogênicos vem sido discutida em diversos artigos e estudos. Os modelos propostos podem ser classificados em três grupos principais:

1. *underplating* máfico que inclui fusão ao menos parcial da crosta por magma máfico de origem mantélica (e.g. BRIDGWATER et al., 1974; EMSLIE, 1978; ANDERSON, 1983; HAPPALA E RÄMÖ, 1990; RÄMÖ E HAPPALA, 1996);
2. processo de fusão de crosta já afinada em ambientes extensionais (VORMA, 1976; WINDLEY, 1991); e
3. magmatismo intracratônico relacionado a processos orogênicos que tomam lugar nas margens cratônicas (TEIXEIRA et al., 1989; BETTENCOURT et al., 1999).

De acordo com observações de Vorma (1976), a análise de dados dos maciços finlandeses Wiborg, Vehmaa, Salmi e Ahvenisto deixa claro que cada um destes corpos representa na verdade um plúton composto (*composite pluton*), constituído por diferentes fases intrusivas que diferem um pouco uma da outra em termos composicionais. Cada intrusão tem seu próprio caminho de diferenciação e idade, evidenciando um *gap* temporal entre os corpos.

Sederholm (1891, 1928) observou que os granitos rapakivíticos finlandeses geralmente são porfiríticos e exibem duas gerações de quartzo e feldspato alcalino, sendo que a primeira geração do último seria representada pelos tão comuns ovoides de feldspato alcalino manteados por uma fina coroa de plagioclásio, normalmente oligoclásio-andesina (textura rapakivi). A formação de megacristais de álcali feldspato de formato ovoide está muito provavelmente relacionada a mudanças de condições físico-químicas do ambiente de geração, que acaba estabilizando o plagioclásio, e permite que este mineral bordeje os megacristais de álcali feldspato.

Características químicas e mineralógicas, juntamente com o modo de ocorrência e associação magmática de granitos rapakivi mostram que os mesmos são compatíveis com granitos tipo-A subalcalinos (HAPPALA & RÄMÖ 1990; EMSLIE 1991; RÄMÖ 1991). Assim, granitos rapakivi podem ser definidos como granitos tipo-A nos quais a textura rapakivi é uma característica importante, ao menos nos batólitos de maiores dimensões (HAPPALA & RÄMÖ 1992). Happala e Rämö (1999) concluíram que o caráter tipo-A dos granitos rapakivi reflete tanto o ambiente tectônico de formação quanto a origem dos magmas

envolvidos, enquanto a textura rapakivi reflete apenas as condições de cristalização do magma.

2.3 Geração da textura rapakivi

Diversos autores propuseram modelos que envolvem equilíbrio de fases e desequilíbrio devido a mudanças nas condições de pressão e temperatura no sistema. Este desequilíbrio levaria à reabsorção parcial de feldspato alcalino e cristalização de plagioclásio (STEWART 1959; WHITNEY 1975) ou ainda co-cristalização de ambos plagioclásio e feldspato alcalino (TUTTLE e BOWEN 1958; CHERRY e TREMBATH 1978). Os últimos autores afirmam ainda que o modelo por eles proposto explica também o formato ovoide incomum dos fenocristais de feldspato potássico, bem como o predomínio da textura porfirítica em granitos rapakivi. Segundo Cherry e Trembath (1978), o desequilíbrio causado pela diminuição de pressão leva à reabsorção parcial do feldspato alcalino enquanto o sistema tenta voltar ao equilíbrio. Este processo de reabsorção seria o grande responsável pelo formato ovoide dos fenocristais de feldspato alcalino; porém, uma fase de cristalização posterior deste mesmo mineral poderia “mascarar” o formato ovoide de grãos não-manteados. De qualquer forma, ainda seria possível reconhecer núcleos ovóides em grãos manteados (textura rapakivi).

Quanto à textura porfirítica, que é a mais comum em granitos rapakivíticos, Cherry e Trembath (1978) acreditam que uma brusca diminuição na pressão do sistema é capaz de levar ao rápido resfriamento do magma durante a cristalização e, desta forma, um único mecanismo pode ser responsável pela geração da textura porfirítica e da textura rapakivi. As mudanças na pressão de H₂O poderiam gerar reflexos como descontinuidades no zoneamento dos cristais de plagioclásio. Apesar destes modelos propostos terem sentido no que tange às mudanças no sistema e conseqüente desequilíbrio de fases, é provável que outros magmas em cristalização também sofram mudanças na pressão e estejam, em algum momento, em desequilíbrio e no entanto, o manteamento de plagioclásio não ocorra.

Hibbard (1981) propôs, então, o modelo de mistura magmática para explicar a geração de textura rapakivi. Segundo o autor, a mistura entre magmas de composição e temperatura contrastantes geraria condições incomuns favoráveis ao desenvolvimento da textura rapakivi. O modelo proposto pelo autor indica que esta mistura magmática teria dois componentes: um magma máfico sob altas temperaturas e um magma félsico em temperaturas relativamente mais frias; no momento da mistura, o magma félsico seria então (super) reauecido. Como

resultado desta mistura incomum, haveria rápida cristalização de plagioclásio, ‘fornecido’ pelo magma máfico. É comum que este plagioclásio seja parcial ou totalmente dendrítico, e mais do que isso, o mesmo forma novos cristais individuais ou como sobrecrecimento, formando coroas de plagioclásio ao redor de cristais de feldspato potássico que, por sua vez, seriam ‘fornecidos’ pelo magma félsico. Uma distribuição heterogênea deste sobrecrecimento de plagioclásio no sistema indica mistura mecânica incompleta entre os componentes máfico e félsico e, como resultado, cristais manteados podem coexistir com cristais não-manteados ou parcialmente manteados. Na verdade, esta feição observada por Hibbard (1981) representa a textura piterlítica de Vorm (1976).

O formato ovoide tão comum em cristais de feldspato potássico também pode ser, segundo o autor, explicado pela mistura magmática: a mistura entre um magma félsico frio e um magma máfico em temperaturas muito mais elevadas resultaria na reabsorção parcial e arredondamento destes cristais. O manteamento só ocorreria em pontos onde o *melt* do componente máfico entrasse em contato com os ovoides de feldspato potássico, cristalizando epitaxialmente o plagioclásio.

O fato é que a teoria do *magma mixing* é mais facilmente aceita quando a mistura é incompleta e ainda é possível observar os dois *end members* do sistema, isto é, quando rochas félsicas coexistem com rochas máficas. No entanto, quando o sistema é homogeneizado devido a um processo de mistura completa, há de se analisar texturas reliquiares e evidências estruturais que indicam mistura magmática, caso haja alguma. Em uma compilação de plútons nos quais textura rapakivi foi observada, Hibbard (1981) observou que a maioria destes continha também inclusões de diabásio e basalto, que o autor interpretou como reliquiares do *end member* máfico que participou da mistura magmática. *Clots* de minerais máficos também foram observados em muitos dos plútons listados pelo autor. É importante ressaltar que todos os 44 plútons compilados por Hibbard (1981) são cálcio-alcálicos, porém segundo Dall’Agnol e Oliveira (2007), granitos tipo-A não tem caráter cálcio-alcálico.

Wark e Stimac (1992) simularam o processo de dissolução de feldspato alcálico durante a mistura magmática e obtiveram mantos de plagioclásio textural e composicionalmente semelhantes àqueles verificados em algumas rochas vulcânicas híbridas. Os experimentos liderados pelos autores levaram à geração de mantos de plagioclásio sódico. Mais uma vez, os autores creditam o formato ovoide dos fenocristais de feldspato potássico ao processo de reabsorção parcial causado pela mistura de magmas. A teoria dos autores encontra suporte em evidências observadas em campo: há uma íntima associação entre estes granitos rapakivíticos e magmatismo máfico na forma de diques, plútons e inclusões máficas.

Dempster et al. (1991) analisaram a evolução textural de granitos rapakivi do sul da Groenlândia utilizando isótopos de Sr, O e H. Segundo os autores, os dados mostram que o processo de exsolução de plagioclásio dos ovoides de feldspato potássico aparentemente controla a geração de textura rapakivi, ao menos, nos granitos analisados no estudo. A exsolução pode ocorrer continuamente ao longo de um grande intervalo de temperatura e as coroas de plagioclásio refletem períodos em que o material exsolvido tinha mais mobilidade no sistema. O plagioclásio seria liberado dos cristais de feldspato alcalino mais enriquecidos em sódio ao longo da evolução do magma e ao mesmo tempo, plagioclásio seria cristalizado como pequenos fenocristais, grãos individuais. Apesar do autor não citar o processo de mistura magmática como responsável pela geração de textura rapakivi, cita a ocorrência de noritos em associação com os granitos rapakivi, e os trata como sincrônicos.

Nekvasil (1991) acredita que o processo de decompressão pode sozinho gerar todas as feições típicas de granitos rapakivi. Mais do que isso, a autora destaca que a geração da textura rapakivi não depende necessariamente da composição do magma e sim das condições físico-químicas vigentes durante a ascensão do magma. É claro que, como coloca a autora, alguns pré-requisitos são necessários para que haja desenvolvimento da textura rapakivi nestas condições: (1) o magma não deve ser saturado em H₂O até o momento ou durante sua ascensão; (2) a taxa de resfriamento do magma durante a ascensão deve estar entre 5 e 10°C; (3) a ascensão ocorreria depois de o magma tornar-se saturado em feldspato alcalino e plagioclásio e (4) a temperatura no momento da decompressão deve ser baixa o suficiente para evitar completa reabsorção do feldspato alcalino durante a ascensão. Desta forma, a decompressão de um magma félsico com pouca água poderia resultar na cristalização de plagioclásio em um magma que até então estaria cristalizando apenas feldspato alcalino. Nekvasil (1991) sugere que os fenocristais da rocha sejam formados durante o primeiro estágio de cristalização, onde a pressão do sistema era mais elevada. As fases minerais que compõem a matriz da rocha, por sua vez, seriam geradas depois do *emplacement*, em um estágio de cristalização mais tardio. Em granitos rapakivíticos, é comum a ocorrência de duas gerações de quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino, indicando que estas três fases perfaziam a assembleia mineral dos primeiros estágios de cristalização.

Quanto ao processo de decompressão em si, a autora acredita que a mudança na temperatura durante a decompressão deve ser próxima do gradiente adiabático, visto que taxas maiores de resfriamento (acima de ~10°C/kbar) resultariam na precipitação de feldspato alcalino, ao invés de sua reabsorção parcial. Já taxas de resfriamento muito baixas (abaixo de ~3°C/kbar) resultariam em reabsorção parcial de plagioclásio juntamente com quartzo e

feldspato alcalino, além de aumentarem as chances de uma reabsorção total deste último. Estas restrições em termos de temperatura podem explicar a associação entre granitos rapakivi, granitos ‘não-rapakivi’ e rochas não-félsicas. De acordo com a explicação dada pela autora, se a geração de granitos rapakivi requer gradientes próximos ao adiabático, então a rocha encaixante através da qual este magma rapakivítico ascende deve ter sido preaquecida, evitando uma perda considerável de calor durante a ascensão do magma. Nekvasil (1991) não faz uso da teoria de mistura magmática para explicar a geração da textura rapakivi, apesar de deixar claro que o *magma mixing* pode, também, gerar esta textura.

Eklund e Shebanov (1999) fizeram uma compilação e discussão das teorias apresentadas mais recentemente acerca da geração de textura rapakivi. Em discussão considerando a teoria da mistura magmática, os autores colocam a importância de se ter um *end member* máfico com características químicas e físicas apropriadas para permitir apenas uma reabsorção parcial do feldspato alcalino, ao invés de sua reabsorção completa. Andersson e Eklund (1994) notaram que xenocristais félsicos provenientes de um magma silicático seriam completamente dissolvidos caso ficassem ‘hospedados’ em enclaves máficos por tempo suficiente. Eklund et al. (1994) investigaram um híbrido rapakivi (15% monzodiorítico e 85% rapakivi) e, segundo as observações dos autores, grande parte de seus ovoides de feldspato potássico foram ‘perdidos’ devido à dissolução causada por uma combinação de descompressão e influxo de calor proveniente do magma máfico.

Na maioria dos casos, granitos rapakivi ocorrem associados a rochas máficas, como enxames de diques de rochas máficas. Eklund e Shebanov (1999) consideram que a intrusão destas rochas seria a fonte de calor necessária para gerar fusão parcial da fonte dos granitos rapakivi e levar à ascensão deste magma félsico. Segundo os autores, os magmas que formaram os granitos rapakivi finlandeses eram, antes da ascensão, subsaturados em água e saturados em cristais (*crystal-saturated*). A intrusão de rochas máficas funcionaria como um ‘gatilho’ que aumentaria a temperatura deste protólito rico em cristais, chegando a 780°C e levando à geração de *melt* suficiente para iniciar o processo de ‘subida’ do magma. Essa ascensão sub-isotermal causaria dissolução parcial de quartzo e feldspato alcalino enquanto plagioclásio seria precipitado. Desta forma, esse processo produziria precipitados tardios de plagioclásio, tanto na forma de cristais eudrais individuais quanto na forma de coroas em volta dos ovoides de feldspato alcalino. Aparentemente, estes autores não consideram o *magma mixing* como processo gerador de textura rapakivi. Neste caso, o magma máfico seria responsável apenas por fornecer o calor suficiente para levar à fusão parcial da fonte geradora de magmas rapakivíticos.