

### 3 ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRAFIA

#### 3.1 Introdução

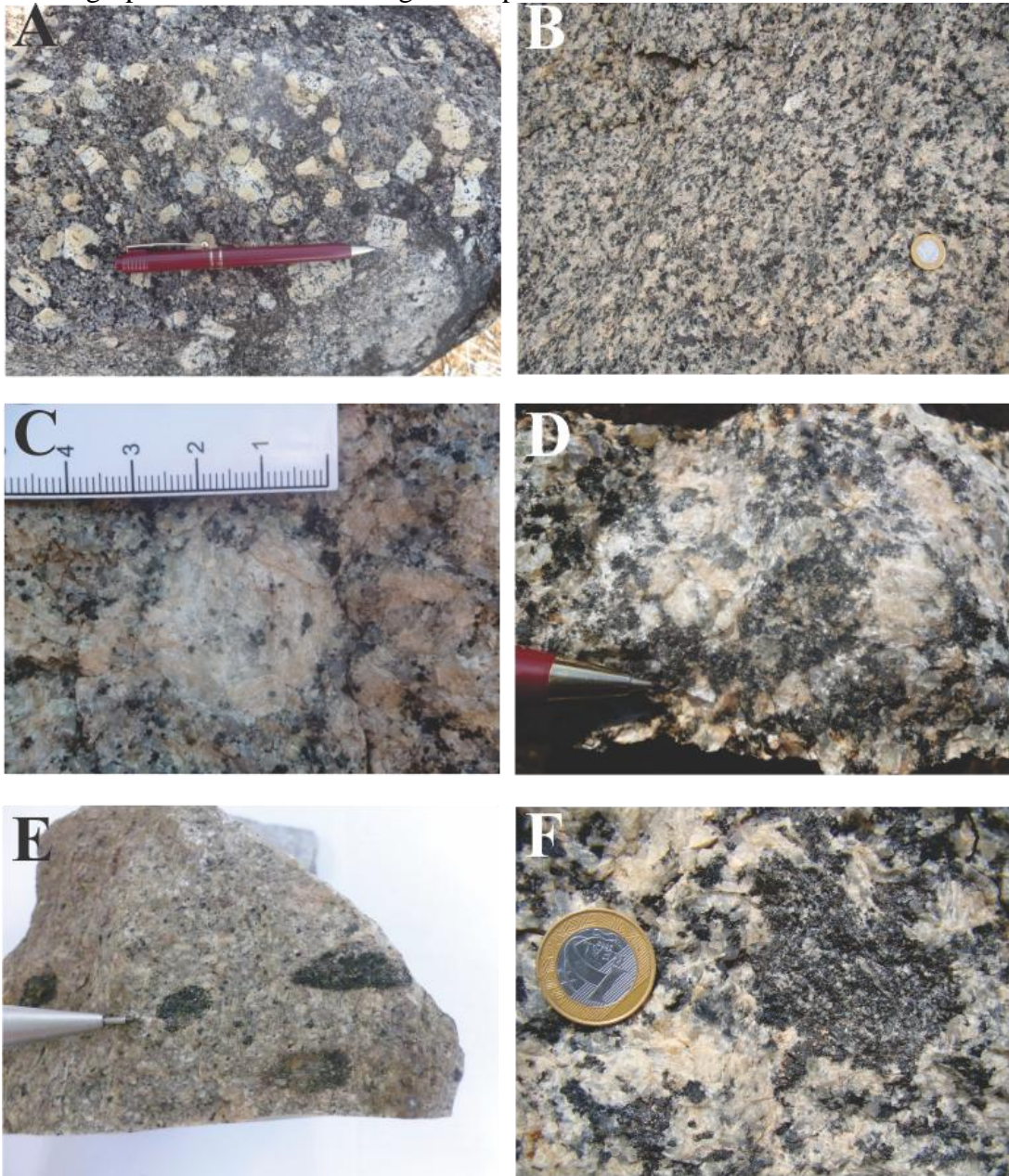
As rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara foram inicialmente estudadas por Kloosterman (1966, 1968), Isotta et al. (1978), Bettencourt et al. (1997, 1999) e em mais detalhes por Leite Júnior (1992, 2002), Nogueira (2010, 2012) e Nogueira et al. (2013). Com o avanço nas pesquisas, novos corpos foram incluídos na Suíte Intrusiva Santa Clara e em revisão mais recente, Quadros et al. (2011) apresenta um total de dezessete maciços, como colocado no Capítulo 1. De acordo com dados disponíveis na literatura, é a primeira vez que os maciços Montenegro, Jatuarana e Jararaca são estudados, além do Maciço Ramos, assim nomeado neste trabalho. Durante os trabalhos de campo, foram feitas tentativas de mapear outros dois maciços incluídos na Suíte Intrusiva Santa Clara por Quadros et al. (2011), porém não foram observados quaisquer afloramentos referentes a estes corpos (Apêndice B). Os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara foram agrupados de acordo com suas características petrográficas, levando-se em consideração a mineralogia observada em cada uma das 128 lâminas confeccionadas para esta tese de doutorado. Este agrupamento foi mantido também na interpretação litogeoquímica, visto que mostrou-se coerente. Assim, a presença de anfibólio configura uma característica importante que foi levada em consideração para agrupar as amostras analisadas. Das 128 amostras, 22 exibem mineralogia que inclui anfibólio e biotita como principais minerais máficos; as demais amostras exibem apenas biotita. Neste capítulo ambos os agrupamentos são apresentados em termos de aspectos de campo e características petrográficas.

#### 3.2 Anfibólio-biotita granitos porfiríticos

O grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos ocorre predominantemente no Maciço Santa Clara, apesar de ter sido observado também nos maciços Montenegro e Oriente Novo. As rochas deste grupo ocorrem na forma de lajedos e blocos que variam entre 2 e 10 metros e somente amostras frescas foram coletadas para processamento e análise litogeoquímica. Estas rochas porfiríticas exibem matriz de granulação média a grossa (Figuras 4A,B) composta por quartzo, plagioclásio, K-feldspato, anfibólio e biotita. Os fenocristais de K-feldspato possuem em média 3 cm e comumente possuem inclusões de minerais máficos

(Figura 4C). No Maciço Montenegro, os fenocristais têm em média 4 cm, porém em diversos afloramentos foram observados fenocristais com 7 cm de tamanho. É importante ressaltar que a textura rapakivi foi observada em raros afloramentos referentes ao grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos, apesar de ser comum a ocorrência de fenocristais de K-feldspato arredondados, que em sua maioria aparecem lado a lado de fenocristais tabulares. Em amostra de mão é notável que estas rochas possuem grande quantidade de minerais máficos (Figura 4D), especialmente quando comparadas àquelas que pertencem ao grupo de biotita granitos, descrito mais adiante. O grupo de anfibólio-biotita granitos exibe uma feição bastante característica que não foi observada no grupo de biotita granitos: *clots* máficos surmicáceos, onde biotita e plagioclásio predominam e quartzo ocorre em pequenas quantidades. Estes *clots* são de coloração escura, granulação muito fina e ora possuem formato de discos alongados (Figura 4E), ora exibem formato ameboide (Figura 4F). Suas dimensões são centimétricas, variando entre 1 e 4 cm.

Figura 4 – Exemplos de aspecto macroscópico e mesoscópico dos litotipos que representam o grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos.



Legenda: Em (A) afloramento de granitoide com matriz de granulação grossa e fenocristais entre 2 e 5 cm de tamanho, rocha típica do Maciço Montenegro (CN-MT-04); (B) afloramento de granitoide típico do Maciço Santa Clara (SC-01), com matriz de granulação média e fenocristais que tem entre 2 e 3 cm; (C) fenocrystal arredondado de K-feldspato com 3 cm de tamanho e inclusões de minerais máficos, feição típica de todos os litotipos deste grupo. Ponto CN-MT-02; (D) amostra retirada do Maciço Montenegro (CN-MT-02) em que fica clara a ocorrência de grande quantidade de minerais máficos na rocha, que possui pouco quartzo livre e predominam K-feldspato e plagioclásio como minerais félsicos; (E) foto de amostra do Maciço Jararaca (CN-JC-02B); granitoide de granulação média com predomínio de minerais félsicos e apresentando *clots* máficos surmicáceos onde biotita e plagioclásio predominam, com raro quartzo. Este *clots* exibem formato de discos alongados, granulação fina e têm entre 1 e 2 cm de tamanho. Em (F), *clot* máfico surmicáceo de mesma composição que o mostrado anteriormente, mas com formato ameboide. Maciço Santa Clara (SC-01).

Fonte: A autora, 2016.

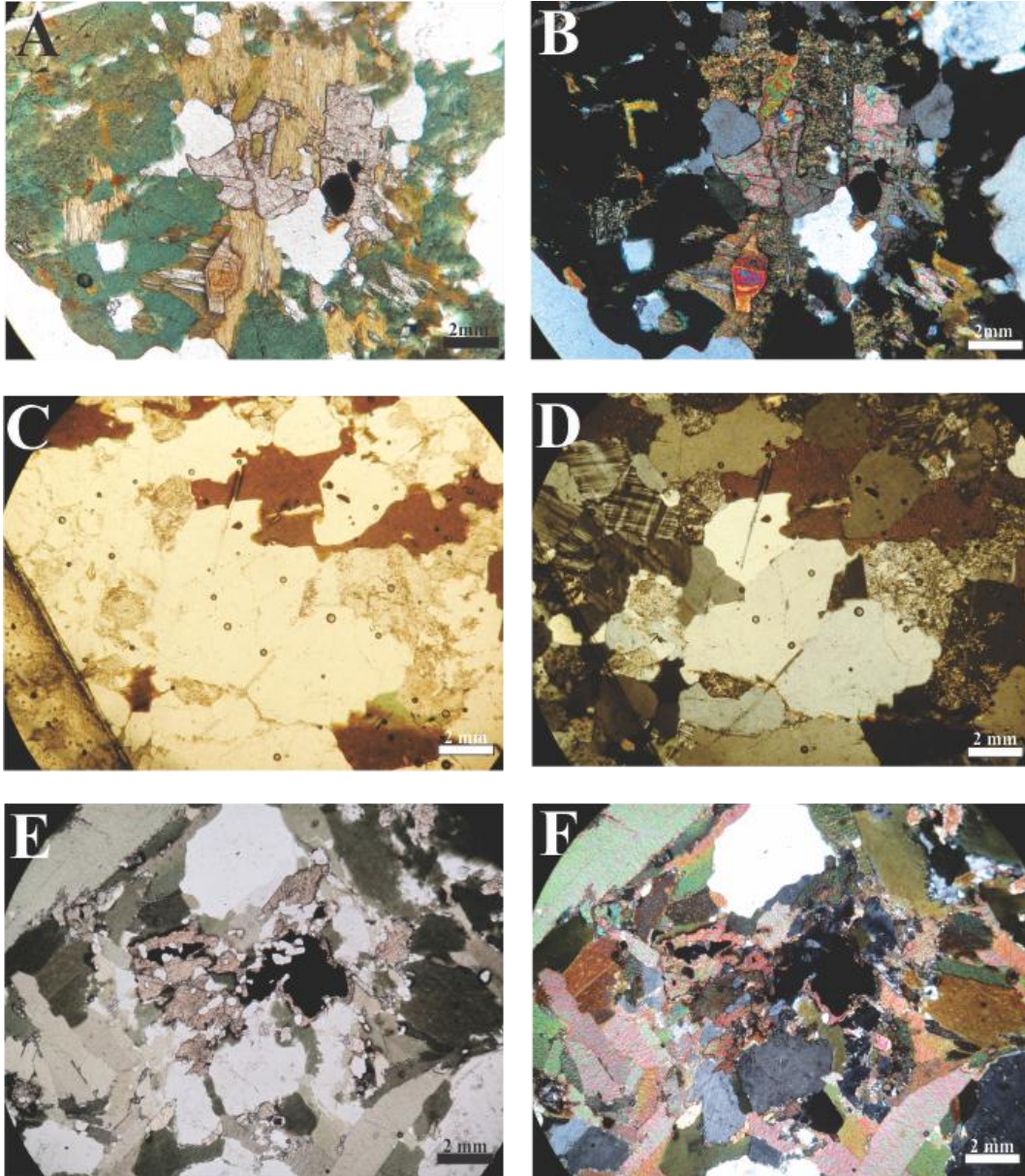
Em análise petrográfica, este grupo exhibe matriz representada por cristais subeuédricos de granulação média a grossa e textura heterogranular na qual fenocristais de K-feldspato destacam-se. A mineralogia principal inclui quartzo (15%), plagioclásio (26%), ortoclásio (18%), biotita (16%), hornblenda (15%) e microclina (10%). Minerais acessórios incluem titanita, opacos e apatita, sendo que algumas poucas amostras mostram também allanita. Titanita, minerais opacos e apatita ocorrem em quantidades apreciáveis. As porcentagens acima mostradas são representativas de um número pequeno de amostras, já que em sua maioria os litotipos deste grupo apresentam grande quantidade de fenocristais de K-feldspato, dificultando a contagem modal.

Os cristais de anfibólio observados em algumas das amostras deste grupo de litotipos não aparenta ser hornblenda e por vezes exhibe pleocroísmo verde turquesa (Figuras 5A,B), assemelhando-se à arfvedsonita. Em algumas amostras há ambos cristais de anfibólio, um de pleocroísmo verde azulado e outro anfibólio de pleocroísmo castanho, neste caso mais semelhante à hornblenda.

Algumas feições ocorrem apenas nas amostras dos litotipos que fazem parte do grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos; as mesmas não foram observadas durante a microscopia das rochas do grupo de biotita granitos. Estas feições incluem: i) apatita acicular (Figuras 5C,D), normalmente inclusa em biotita e anfibólio; ii) pequenos aglomerados de minerais máficos como biotita, anfibólio, titanita e minerais opacos (Figuras 5E,F); algumas vezes allanita também é observada. A titanita que ocorre associada a estes aglomerados máficos é sempre anédrica e, ao que parece, formada a partir de reação química dos minerais opacos (Figuras 5E,F); iii) ocorrência de duas gerações de biotita, característica melhor descrita a seguir; iv) é comum observar inclusão de minerais opacos em cristais de biotita que ocorrem associados aos cristais de anfibólio; v) textura poiquilítica em quartzo e K-feldspato é comum; vi) reação de desequilíbrio onde há conversão de biotita para anfibólio; neste caso, é comum que os cristais de biotita apareçam com aspecto bastante distinto, como se estivessem “rasgados” e com contornos serrilhados (Figuras 6A,B,C,D). Como citado anteriormente, duas gerações de biotita podem ser distinguidas; a primeira geração ocorre associada aos cristais de anfibólio e possuem coloração mais amarronzada que o normal em algumas amostras, possivelmente refletindo maior quantidade de ferro em sua composição química. Estes cristais de biotita encontram-se sempre reagindo com o anfibólio adjacente e exibem textura característica, com seus contornos serrilhados e aparência “rasgada”, como descrito brevemente acima. A segunda geração de biotita, mais precoce, não ocorre associada aos cristais de anfibólio e exhibe aparência mais condizente com aquela esperada para uma

biotita: coloração marrom, *bird's eye* evidente, contornos bem definidos e hábito lamelar.

Figura 5 – Fotomicrografias referentes a litotipos do grupo de anfibólio-biotita granitos porfíricos.



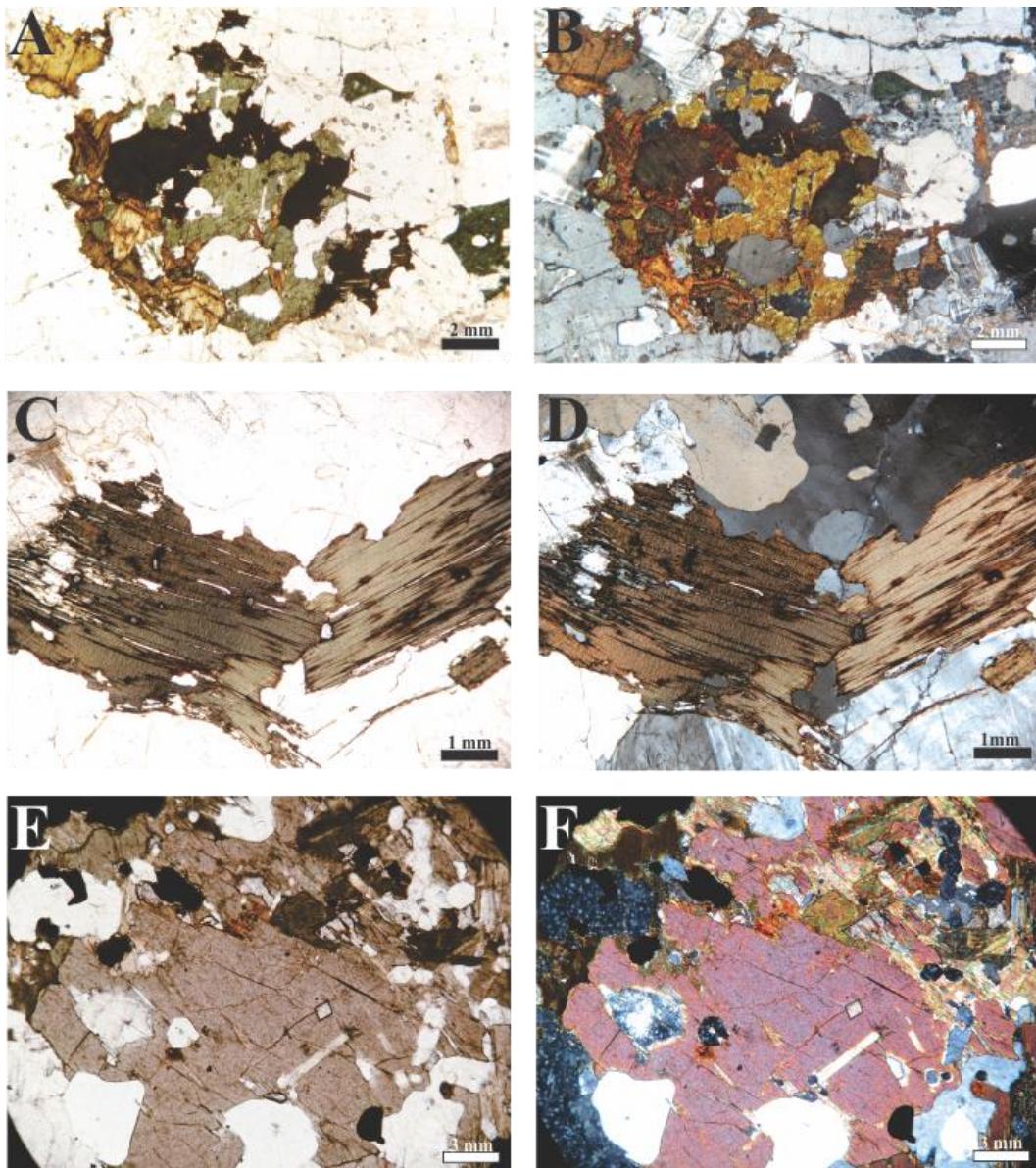
Legenda: Na coluna à esquerda, fotos tiradas com nicois paralelos e na coluna à direita, nicois cruzados. Em (A,B) associação entre anfibólio sódico, exibindo pleocroísmo verde turquesa, e outros minerais máficos como biotita, titanita e opacos; amostra CN-MT-02D; em (C,D) ocorrência de apatita acicular, de cristalização tardia, inclusa em cristais de quartzo e biotita. Amostra SC-01F; (E,F) aglomerados de minerais máficos como biotita, titanita e opacos. É bastante comum que anfibólio também faça parte desta associação. Nota-se a geração de titanita anédrica a partir de minerais opacos. Amostra SC-02B.

Fonte:: A autora, 2016

Textura mirmequítica é bastante comum e cristais de feldspato sericitizados também foram observados. Cristais de apatita ocorrem sob duas formas: acicular (entre 0,5 e 1,0 mm), e, neste caso, geralmente incluso em minerais máficos, especialmente biotita e anfibólio,

apesar de algumas vezes aparecerem inclusos em quartzo, e prismáticos (entre 0,2 e 0,3 mm) também tardios e inclusos principalmente nos minerais máficos (Figuras 6E,F).

Figura 6 – Fotomicrografias de litotipos do grupo de anfibólio-biotita granitos porfiríticos mostrando reações de desequilíbrio entre biotita e anfibólio (A,B; amostra CN-RT-14) e aspecto “rasgado” dos cristais de biotita (C,D). Amostra SC-02A. 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). Amostra CN-MT-02A.



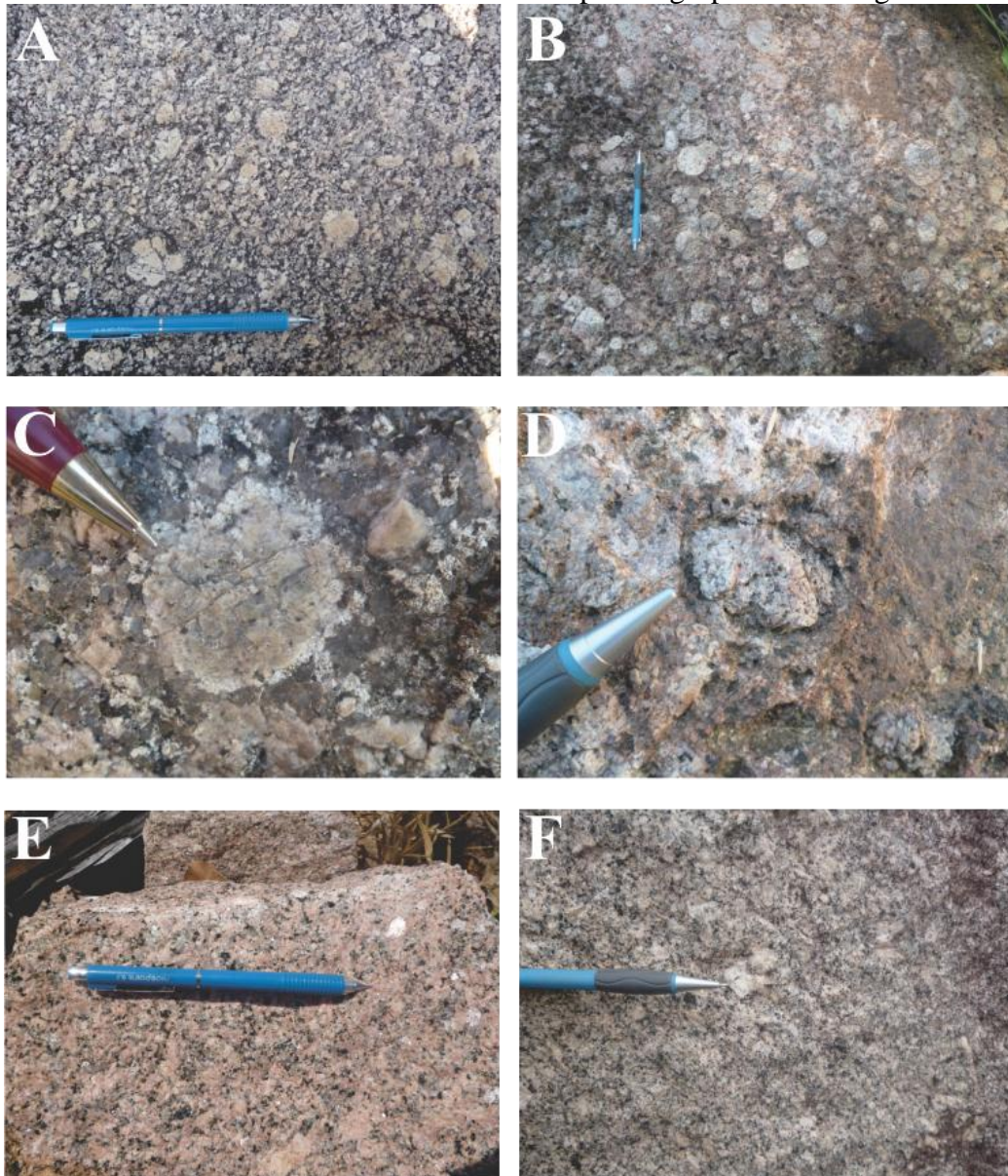
Fonte:: A autora, 2016

### 3.3 Biotita granitos porfiríticos e equigranulares

As rochas que fazem parte do grupo de biotita granitos predominam na Suíte Intrusiva Santa Clara, tendo sido observadas em todos os corpos que perfazem a suíte e ocorrem na forma de blocos e lajedos. Estas rochas ora exibem textura porfirítica, ora textura equigranular, porém a mineralogia é a mesma e consiste em K-feldspato, quartzo, plagioclásio e biotita. Os tipos porfiríticos têm matriz de granulação média a grossa e fenocristais de K-feldspato que variam de 1 cm a 4 cm, embora fenocristais de cerca de 7 cm também tenham sido observados (Figura 7A). Alguns afloramentos compreendem piterlitos (Figura 7B), isto é, a maioria de seus ovoides de K-feldspato não possui textura rapakivi (Figura 7C), apesar desta ter sido observada em alguns pontos. Muitas vezes é mais fácil observar a textura rapakivi quando o manto de sobrecrecimento de plagioclásio já foi removido, o que deixa o ovoide de K-feldspato ressaltado (Figura 7D). Os tipos que apresentam textura equigranular tem granulação média (Figura 7E) e em raros afloramentos são intrudidos por veios de composição quartzo-feldspática.

Ao contrário do grupo de anfibólio-biotita granitos, estes biotita granitos não exibem *clots* máficos surmicáceos, e apresentam-se como rochas bastante homogêneas e coloração que varia desde rosada (Figura 7E), mais comum nos litotipos equigranulares e observada nos maciços Manteiga, Jararaca e Retiro, até cinzenta (Figura 7F), comum nos tipos de textura porfirítica e predominante nos demais corpos da Suíte Intrusiva Santa Clara.

Figura 7 – Fotos de afloramentos referentes aos litotipos do grupo de biotita granitos.



Legenda: Em (A) visão do afloramento mostrando a textura porfirítica, predominante nas rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara. Os fenocristais de K-feldspato têm em média 3cm, mas chegam aos 7cm em alguns afloramentos. Ponto CN-RT-17. Em (B), foto de afloramento de biotita granito piterlítico, denominação dada a rochas que exibem textura rapakivi, porém apenas alguns de seus ovoídes de K-feldspato possuem a coroa de plagioclásio. Ponto CN-RA-01. Em (C), exemplo de textura rapakivi encontrada nas rochas desta suíte. Ponto CN-MT-02; em (D) feição comumente observada na Suíte Intrusiva Santa Clara, onde aparentemente a coroa de plagioclásio foi removida pelo intemperismo, ressaltando o ovoide de K-feldspato. Ponto CN-RA-04. Em (E) exemplo de biotita granito equigranular de granulação média e coloração rosada, comum nos maciços Manteiga, Jararaca e Retiro, localizados na porção sul da suíte. Ponto CN-RT-08; (F) biotita granito porfirítico com matriz de granulação média e coloração cinzenta, que predomina nos corpos da Suíte Intrusiva Santa Clara. Ponto CN-JC-04.

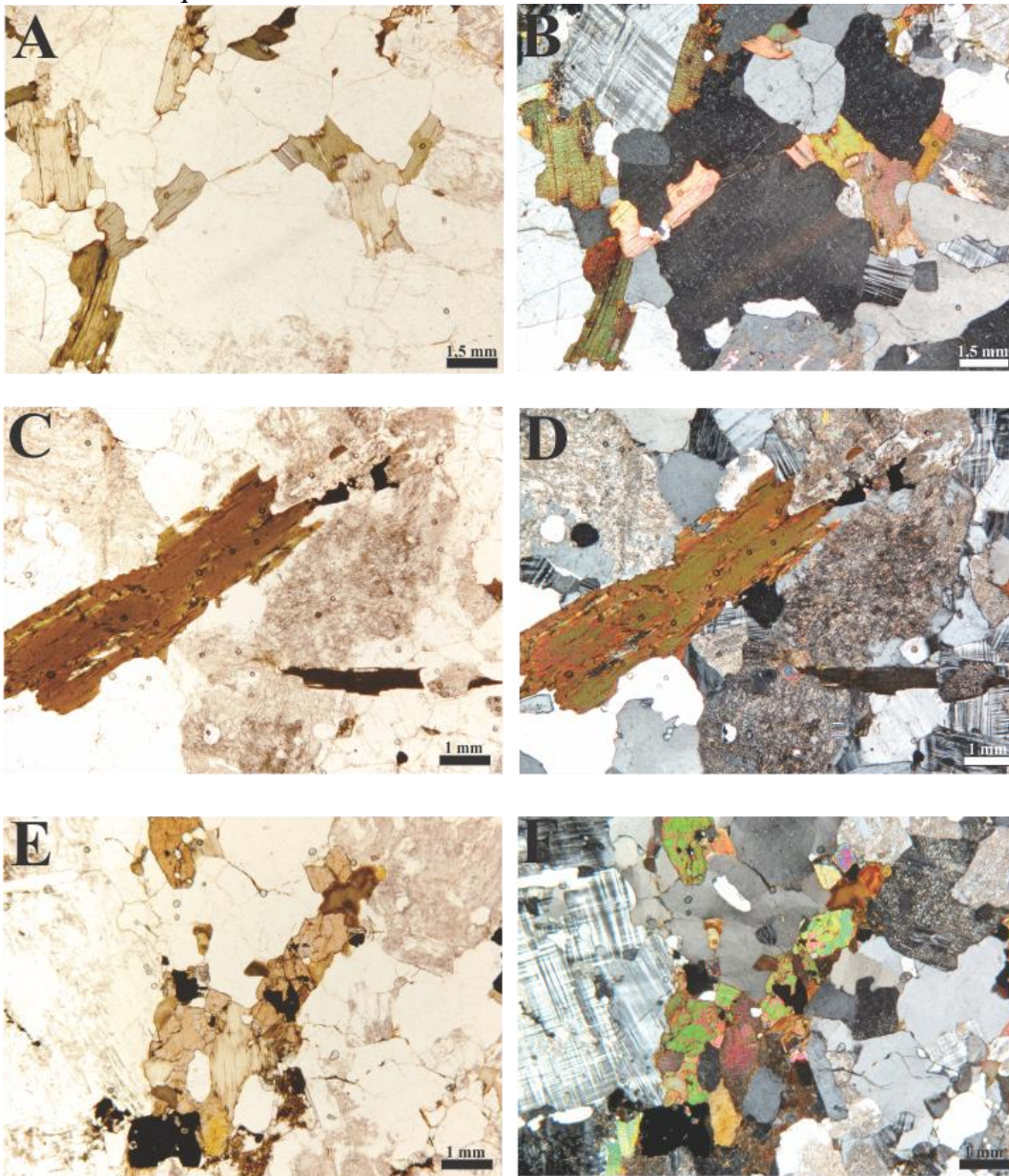
Fonte:: A autora, 2016

Em análise petrográfica, as rochas do grupo de biotita granitos têm mineralogia principal que inclui microclina (48%), quartzo (30%), plagioclásio (12%) e biotita (10%). Os grãos de quartzo são subédricos a anédricos e os grãos de microclina, plagioclásio e biotita



são subédricos (Figuras 8A,B). Ao contrário das rochas do grupo de anfibólio-biotita granitos, ortoclásio foi raramente observado nestes biotita granitos. Processo de cloritização é comum (Figuras 8C,D) e titanita, allanita, zircão e minerais opacos representam a fase acessória destas rochas. A titanita é comumente anédrica e ocorre associada aos minerais opacos. Em algumas amostras, é possível notar uma associação entre todos os minerais máficos, com cristais de biotita, minerais opacos e titanita concentrados e conectados uns aos outros (Figuras 8E,F). As plaquetas de biotita mostram coloração amarronzada e pleocroísmo que vai do marrom claro ao verde pálido; é comum que os cristais de feldspato, principalmente o plagioclásio, apresentem-se sericitizados. É importante ressaltar que, nas amostras referentes a estes litotipos, não foram observados cristais de apatita acicular. Alguns poucos cristais de rutilo foram observados em algumas das amostras.

Figura 8 – Fotomicrografias referentes aos litotipos do grupo de biotita granitos porfíricos e equigranulares; nicois paralelos na coluna à direita e nicois cruzados na coluna à esquerda.



Legenda: Em (A,B) visão geral das lâminas delgadas que representam estes litotipos, compostos por microclina, quartzo, plagioclásio e biotita. No centro da foto, pequeno cristal de allanita com borda reativa incluso em biotita. Amostra CN-RT-09C. Em (C,D) processo de cloritização de biotita em plaqueta à esquerda na foto; processo de sericitização de cristal de plagioclásio à direita. Amostra CN-JT-01C. Em (E,F) associação de fases máficas como biotita, titanita e minerais opacos, sugerindo possível reação química entre estes. Amostra CN-JT-02A.

Fonte:: A autora, 2016

## 4 LITOGEOQUÍMICA

### 4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os dados de litogeoquímica através de diagramas comumente utilizados pela comunidade científica a fim de caracterizar os litotipos estudados e sugerir possíveis fontes e processos petrogenéticos envolvidos na geração destas rochas. Para esta tese de doutorado, um total de 85 amostras de litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara foi analisado (Apêndice C); todas estas amostras foram coletadas durante as fases de mapeamento geológico realizadas pela autora e seu orientador. A seleção das amostras para litogeoquímica foi feita com o objetivo de se analisar a maior variedade possível de fácies e litotipos. Todas as amostras foram processadas pela própria autora nas dependências do Laboratório Geológico de Preparação de Amostras, na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (LGPA/UERJ) e as análises foram realizadas no *Activation Laboratories Ltda.* (ACTLABS, Canadá). Todas as etapas do processamento das amostras selecionadas encontram-se descritas no Anexo A, bem como o tipo de análise litogeoquímica escolhida e seus limites de detecção.

A tabela com os resultados das análises de litogeoquímica é apresentada no Apêndice D, e inclui a análise de elementos maiores, expressos em porcentagem por peso ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), perda ao fogo (PF) e a soma de todos os óxidos (Total). As análises incluem também os elementos-traço incompatíveis móveis (Ba, Rb, Sr, U e Th) e os imóveis (Zr, Y, Nb, Hf), os elementos compatíveis (Ni, Cr, V e Co) e elementos terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu), todos expressos em partes por milhão (ppm). Os valores de ferro usados são expressos sob a forma de ferro férrico total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$ ), e os dados foram recalculados para 100% em base anídrica para plote nos diagramas apresentados.

Os diagramas geoquímicos apresentados neste capítulo da dissertação foram montados com o auxílio do software gratuito *GCDkit 4.0 (Geochemical Data Toolkit)* de Janousek et al. (2006), do programa *Microsoft Excel* e do programa *CorelDRAW X7*. Este último software também foi utilizado a fim de melhorar o *design* dos gráficos, deixando-os mais adequados para a tese de doutorado.

A divisão definitiva de litotipos na litogeoquímica levou em consideração os agrupamentos feitos a partir das observações de campo e caracterização petrográfica. Em um

primeiro momento, todas as 85 amostras foram plotadas em conjunto, e diversos outros agrupamentos foram feitos na tentativa de identificar possíveis *trends*. Tendo em mãos dados geocronológicos, muitos inéditos, a autora tentou também agrupamentos que levassem em consideração as idades de cristalização para cada corpo da Suíte Intrusiva Santa Clara, porém de maneira geral observa-se uma superposição destas idades, dificultando essa abordagem. Independente dos vários aspectos levados em consideração ao formar os agrupamentos para utilizar nos diagramas geoquímicos, a autora percebeu que, de maneira geral, dois grupos de litotipos podiam ser notados: pouco mais de 20 amostras formavam um agrupamento, ficando concentradas em um intervalo de SiO<sub>2</sub> entre 62,38% e 65,57%; as demais amostras concentravam-se em intervalos de SiO<sub>2</sub> mais elevados, indo de 69,15% até 79,20%. Algumas poucas amostras mostravam comportamento distinto, se “misturando” ao outro agrupamento. A observação deste padrão, que fica bastante evidente nos diagramas bivariantes de Harker, pode ser interpretada em conjunto com as feições descritas durante a caracterização petrográfica. Assim, a autora utilizou a mesma divisão de agrupamentos de aspectos de campo e petrografia, isto é, também nos diagramas geoquímicos as amostras foram agrupadas em anfibólio-biotita granitos (total de 24 amostras) e biotita granitos (total de 61 amostras). É importante ressaltar que a autora teve cuidado ao processar as amostras de rochas porfiríticas, evitando que uma quantidade exagerada de fenocristais de K-feldspato fosse analisada. Assim, a autora interpreta que as amostras analisadas representem líquidos magmáticos.

Neste capítulo, os dados de litogeoquímica de todas os litotipos coletados da Suíte Intrusiva Santa Clara são apresentados em conjunto, sendo separados por símbolos distintos de acordo com o agrupamento do qual fazem parte. A autora optou por esta forma de apresentação porque considera que assim as diferenças geoquímicas entre os dois grupos de amostras (anfibólio-biotita granitos e biotita granitos) ficam mais evidentes e também porque torna mais fácil uma comparação entre estes grupos.

#### **4.2 Discriminação de Séries, Suítes e Classificações dos Litotipos**

As normas permitem calcular matematicamente quais minerais poderiam ser cristalizados levando-se em consideração a composição química total da rocha. Estes cálculos fornecem minerais normativos que podem ou não ser encontrados na moda do litotipo. Todas as rochas analisadas da Suíte Intrusiva Santa Clara são supersaturadas em sílica, com quartzo normativo presente. Comparando as tabelas referentes aos dois agrupamentos de rochas (anfibólio-biotita granitos e biotita granitos), é possível observar que o grupo de anfibólio-

biotita granitos exhibe menores quantidades de quartzo e coríndon normativos, sendo que cerca de 80% das amostras nem mesmo exhibe este último mineral na norma. Este mesmo grupo de amostras exhibe maiores quantidades de anortita, apatita e hematita normativas do que as amostras de biotita granitos analisadas. É também interessante notar que a maior parte das amostras de biotita granitos não exhibe anfibólio normativo, o oposto do observado nas amostras de anfibólio-biotita granitos. As tabelas 2 e 3 abaixo apresentam os resultados obtidos a partir dos cálculos normativos; a norma utilizada foi a “*granite mesonorm*”, de *Mielke & Winkler (1979)*.

É comum que rochas com coríndon normativo sejam consideradas peraluminosas, porém esta informação deve ser complementada com observações de outras características geoquímicas e observações petrográficas. Na moda destes litotipos não foram descritos minerais que espera-se encontrar em granitos peraluminosos (muscovita, granada, cordierita, topázio, turmalina, espinélio, coríndon, aluminossilicatos) e como será colocado mais adiante, estas rochas são predominantemente metaluminosas a fracamente peraluminosas.

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.

Amp-bt granitos	Ortoclásio	Albita	Anortita	Quartzo	Apatita	Hematita	Ilmenita	Biotita	Anfibólio	Corindon	Resta	Soma
SC-04	32,548	21,26	9,331	19,898	1,109	7,54	1,017	0,032	5,097	0	-0,127	97,705
SC-01F	21,898	24,309	15,827	23,202	1,274	7,58	1,044	2,377	1,474	0	-0,162	98,823
CN-JC-02B	27,58	25,495	8,741	21,228	0,732	8,55	0,915	-2,274	8,075	0	-0,078	98,962
SC-02A	23,075	23,293	12,946	24,841	1,133	7,73	0,997	0,698	4,138	0	-0,138	98,713
SC-03	25,967	22,446	14,364	24,248	0,779	6,09	0,808	2,271	0,546	0	-0,129	97,39
CN-MT-02C	35,006	27,866	10,976	16,322	0,519	5,94	0,621	0,07	3,063	0	-0,076	100,307
CN-MT-02B	27,402	29,73	7,291	26,905	0,543	3,4	0,385	2,304	0,905	0	-0,131	98,734
SC-29	23,786	24,902	10,937	33,802	0,566	3,59	0,431	0,357	1,629	0	-0,06	99,94
SC-01G	29,973	22,276	11,435	23,985	0,92	5,54	0,704	1,796	0,893	0	-0,116	97,407
SC-07	23,811	26,088	17,05	23,011	0,85	5,85	0,745	1,832	1,228	0	-0,124	100,34
CN-MT-06A	32,332	19,312	4,4	38,091	0,094	2,2	0,169	-0,658	1,961	0	-0,014	97,887
SC-15	40,053	26,681	7,892	15,801	0,401	4,4	0,502	-0,468	3,824	0	-0,066	99,019
SC-05	27,18	25,664	13,276	22,526	0,755	5,96	0,674	-0,379	4,421	0	-0,089	99,988
SC-01A	29,113	17,109	10,951	28,958	0,897	6,71	0,885	2,672	0,422	0	-0,146	97,571
SC-30B	26,169	25,156	12,588	25,251	0,59	4,83	0,564	1,731	0,437	0	-0,098	97,218
CN-MT-02A	35,225	23,547	7,811	21,585	0,637	6,56	0,703	-1,188	5,395	0	-0,07	100,205
CN-ON-04A	30,937	25,749	8,073	23,796	0,496	5,72	0,695	2,823	1,092	0	-0,158	99,223
CN-MT-03B	30,148	24,224	9,093	24,01	0,401	5,56	0,729	0,111	5,441	0	-0,127	99,591
SC-02B	15,186	32,44	13,241	24,662	0,519	5,29	0,826	0,473	5,346	0	-0,143	97,841
SC-01D	34,043	17,872	8,392	28,327	0,283	4,24	0,483	2,02	1,981	0	-0,137	97,503
SC-01C	34,525	22,022	11,531	22,992	0,85	5,36	0,694	2,265	0	0,02	-0,118	100,141
SC-24	27,943	23,716	12,356	24,563	0,802	5,13	0,695	2,298	0	0,216	-0,119	97,601
SC-25	28,577	23,377	11,313	25,303	0,732	5,16	0,655	2,244	0	0,367	-0,115	97,612
CN-ON-03B	44,263	23,631	5,162	22,143	0,142	2,8	0,268	0,762	0	0,686	-0,037	99,82
SC-06	27,532	21,853	12,102	23,558	1,18	6,67	0,956	3,139	0	0,82	-0,164	97,645
Valores mínimos	15,186	17,109	4,4	15,801	0,094	2,2	0,169	-2,274	0	0	-0,164	97,218
Valores máximos	44,263	32,44	17,05	38,091	1,274	8,55	1,044	3,139	8,075	0,82	-0,014	100,34

Fonte: MIELKE & WINKLER, 1979.

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.

Bt granitos	Ortoclásio	Albita	Anortita	Quartzo	Apatita	Hematita	Ilmenita	Biotita	Anfibólio	Corindon	Resta	Soma
CN-JC-02A	35,52	27,697	6,819	23,108	0,26	3,31	0,468	2,501	0	-0,002	-0,116	99,565
SC-19A	27,251	20,582	10,83	31,376	0,661	4,22	0,535	0,978	1,706	0	-0,092	98,047
CN-JC-04A	27,554	28,544	7,243	29,012	0,33	2,56	0,308	0,016	2,508	0	-0,06	98,016
CN-JC-04B	30,095	27,104	7,767	25,964	0,472	4,29	0,591	1,906	1,612	0	-0,128	99,673
CN-RT-08A	33,127	24,14	3,585	32,294	0,047	2,62	0,152	-1,249	2,479	0	0,004	97,198
CN-ON-03A	36,974	16,432	7,032	33,69	0,142	3,22	0,305	-0,426	2,028	0	-0,026	99,369
CN-RT-17A	36,014	25,664	3,03	30,102	0,047	2,09	0,14	-1,057	2,036	0	0,007	98,074
CN-OV-03A	37,743	21,26	4,931	31,224	0,307	2,97	0,34	1,241	0,382	0	-0,069	100,328
CN-PR-02	31,897	33,033	2,758	28,543	0,094	2,46	0,141	-0,315	1,043	0	-0,008	99,646
CN-RT-03A	33,741	24,14	3,737	33,207	0	2,24	0,131	-0,635	1,424	0	-0,001	97,984
CN-RT-17C	33,789	25,156	1,824	32,816	0,024	2,12	0,133	-2,598	4,393	0	0,027	97,683
CN-RA-02A	29,305	24,224	5,427	36,04	0,094	3,12	0,204	-0,803	2,259	0	-0,013	99,857
CN-RT-17B	34,072	24,224	2,927	34,057	0	2,31	0,142	-1,831	3,217	0	0,018	99,135
CN-RT-09B	28,68	24,563	3,755	37,953	0	2,12	0,108	-0,905	1,733	0	0,005	98,013
CN-RT-09C	35,871	21,514	3,44	36,069	0,047	2,28	0,111	-0,732	1,528	0	0	100,129
CN-RT-09	31,629	24,563	3,442	36,997	0,024	1,8	0,101	-0,42	0,993	0	-0,002	99,126
CN-JC-01B	28,573	27,697	4,885	36,721	0	1,31	0,09	-0,682	1,739	0	-0,008	100,325
SC-02C	32,332	25,241	5,375	33,604	0,047	1,35	0,148	0,861	0	0,035	-0,039	98,954
CN-MG-05A	32,522	22,446	4,813	36,136	0,071	1,92	0,146	0,489	0	0,037	-0,023	98,556
CN-RT-10	34,181	22,361	3,639	35,463	0,047	1,99	0,119	0,221	0	0,074	-0,011	98,084
CN-MT-04	40,026	20,074	4,714	30,116	0,071	2,01	0,167	0,578	0	0,083	-0,027	97,81
CN-MT-02E	33,122	21,006	7,099	32,751	0,212	3,28	0,329	1,242	0	0,083	-0,06	99,064
CN-JC-03A	33,368	27,697	4,829	31,786	0,047	1,46	0,117	0,561	0	0,106	-0,025	99,945
CN-OV-02A	34,979	25,325	6,305	28,126	0,212	3,2	0,286	1,13	0	0,139	-0,054	99,648
CN-ON-01B	44,459	22,107	2,762	28,993	0,024	1,14	0,097	0,318	0	0,155	-0,015	100,04
CN-JT-03	31,794	26,088	8,273	27,947	0,236	3,05	0,307	1,915	0	0,164	-0,089	99,685
CN-OV-03B	33,944	24,648	7,436	26,191	0,448	4,49	0,528	2,464	0	0,178	-0,118	100,208
CN-JC-07A	36,44	26,088	4,581	31,544	0,047	0,75	0,076	0,386	0	0,18	-0,018	100,074
CN-MT-05	30,802	20,921	6,172	36,569	0,189	3,63	0,331	1,09	0	0,182	-0,053	99,834

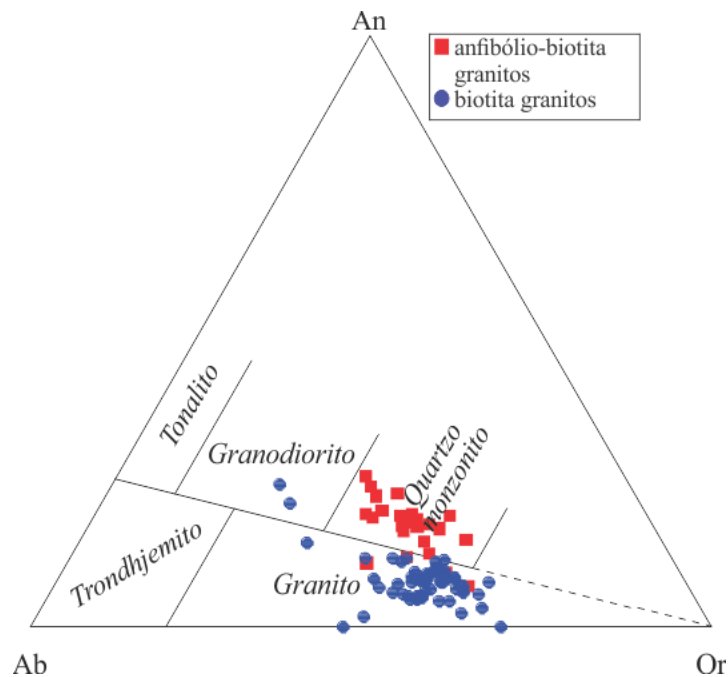
Bt granitos	Ortoclásio	Albita	Anortita	Quartzo	Apatita	Hematita	Ilmenita	Biotita	Anfibólio	Corindon	Resta	Soma
CN-MT-01A	33,298	21,175	6,817	31,448	0,189	2,92	0,299	1,071	0	0,223	-0,052	97,388
CN-ON-02A	28,401	21,344	5,242	40,797	0,024	3,15	0,136	0,387	0	0,291	-0,017	99,753
CN-MG-05B	28,03	20,667	4,73	43,164	0,047	1,96	0,162	0,492	0	0,294	-0,023	99,523
CN-ON-01A	31,021	24,055	7,164	29,792	0,189	5,27	0,475	1,451	0	0,312	-0,069	99,658
SC-14F	34,953	20,667	5,164	32,126	0,212	2,86	0,383	1,493	0	0,322	-0,072	98,109
CN-RT-13B	35,824	21,09	4,619	31,878	0,212	2,83	0,311	1,094	0	0,372	-0,053	98,176
CN-RT-13A	34,22	22,276	5,76	31,267	0,212	3,06	0,342	1,19	0	0,373	-0,058	98,641
CN-JC-01A	32,526	24,648	2,877	36,974	0	1,22	0,083	0,315	0	0,41	-0,014	99,038
CN-JT-02A	34,508	22,954	6,47	30,498	0,189	2,63	0,255	1,487	0	0,464	-0,069	99,385
CN-MT-01B	34,366	19,735	5,379	33,18	0,189	2,99	0,296	1,157	0	0,546	-0,055	97,783
CN-JT-03A	30,186	25,749	7,73	27,873	0,307	3,45	0,396	2,18	0	0,559	-0,103	98,327
CN-PR-01A	27,453	32,355	0,133	38,362	0,024	0,95	0,058	0,122	0	0,585	-0,006	100,036
CN-MT-08A	31,015	19,058	5,045	40,408	0,094	2,95	0,257	0,87	0	0,588	-0,041	100,244
CN-RA-02B	29,005	27,612	4,563	36,688	0	1,1	0,062	0,285	0	0,591	-0,012	99,894
SC-08	13,465	21,514	5,92	52,901	0,047	2,36	0,18	0,525	0	0,639	-0,025	97,527
CN-MT-02D	30,261	18,126	5,444	38,354	0,165	3,66	0,351	1,363	0	0,699	-0,065	98,358
SC-14B	32,163	21,768	5,994	31,849	0,307	3,9	0,438	1,865	0	0,767	-0,089	98,961
CN-JT-01B	33,677	24,055	5,658	30,983	0,142	2,42	0,228	1,226	0	0,771	-0,057	99,102
CN-JT-01A	32,144	24,732	6,073	29,706	0,189	2,53	0,233	1,31	0	0,806	-0,062	97,662
CN-JT-04A	32,435	25,579	5,045	31,469	0,094	2,26	0,19	0,972	0	0,808	-0,045	98,808
CN-RT-05	34,371	19,312	4,385	36,588	0,118	2,57	0,256	1,072	0	0,874	-0,05	99,496
CN-RT-06	32,336	21,006	5,196	35,648	0,165	3,14	0,319	1,193	0	0,893	-0,056	99,84
SC-13	39,884	18,803	4,837	27,938	0,33	3,93	0,525	1,875	0	0,915	-0,091	98,946
SC-09	12,766	25,579	10,388	41,786	0,189	3,42	0,366	1,36	0	0,93	-0,065	96,718
SC-14C	30,336	20,667	6,46	33,063	0,425	4,12	0,542	2,456	0	0,94	-0,118	98,891
CN-JT-01C	33,495	24,055	5,559	31,552	0,142	2,48	0,236	1,332	0	0,959	-0,061	99,748
CN-OV-01A	38,426	21,937	4,278	27,801	0,425	3,93	0,445	1,78	0	1,02	-0,088	99,954
SC-14A	33,12	21,344	5,331	31,641	0,26	3,28	0,433	1,752	0	1,031	-0,084	98,109
CN-RA-05A	33,703	22,022	8,253	26,973	0,118	3,59	0,428	3,895	0	1,05	-0,175	99,857
CN-ON-02C	36,738	21,09	1,339	37,339	0	1,78	0,03	0,121	0	1,482	-0,005	99,915
SC-14E	33,064	21,429	4,47	33,288	0,212	2,78	0,412	1,484	0	1,764	-0,072	98,832
Valores mínimos	35,52	27,697	6,819	23,108	0,26	3,31	0,468	2,501	0	-0,002	-0,116	99,565
Valores máximos	44,459	33,033	10,83	52,901	0,661	5,27	0,591	3,895	4,393	1,482	0,027	100,328

Fonte: MIELKE & WINKLER, 1979.



Utilizando a clássica norma CIPW em conjunto com o diagrama ternário Ab-An-Or (Figura 9), nota-se que de maneira geral as rochas que fazem parte do grupo de anfibólio-biotita granitos têm composições médias semelhantes a quartzo-monzonitos (com raros granitos) e aquelas que representam o grupo de biotita granitos são predominantemente granitos, com raros granodioritos.

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.



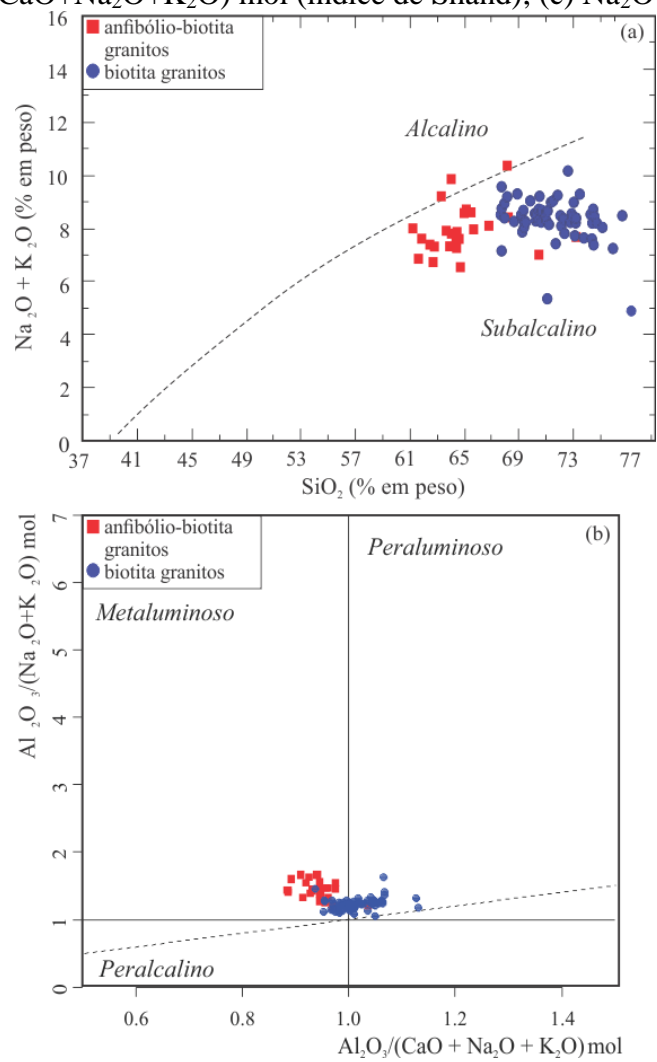
Fonte: O'CONNOR, 1965

Como mencionado anteriormente, os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara exibem teores de  $\text{SiO}_2$  entre 62,38% e 79,20%; os menores valores correspondem às amostras do grupo de anfibólio-biotita granitos, com teores de  $\text{SiO}_2$  entre 62,38% e 74,96% e valores médios de  $\text{SiO}_2$  de 66,22%. As amostras do grupo de biotita granitos exibem teores de  $\text{SiO}_2$  mais elevados, indo de 69,15% até 79,20% e média de valor igual a 73,15%. Assim, é possível perceber que as amostras de anfibólio-biotita granitos são relativamente menos evoluídas em relação àquelas que representam biotita granitos. Os valores da razão  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$  para os anfibólio-biotita granitos variam entre 0,83 e 0,95, com média de 0,91 e os valores dessa mesma razão para os biotita granitos variam entre 0,78 e 0,99, com média de 0,93. Estes valores podem ser comparados aos granitos Artjärvi e Säaskjärvi, *stocks* que fazem parte do batólito Wiborg (Finlândia), que exibem valores de  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$

entre 0,83 e 0,95 (LUKKARI, 2002). Também são semelhantes aos granitos Jamon e Musa, granitos anorogênicos do Paleoproterozóico da Província Amazônica Central, que têm razões entre 0,83 e 0,96 (DALL'AGNOL et al., 1999)

Todos os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara têm caráter subalcalino (Figura 10a); três amostras caem no limite entre os campos subalcalino e alcalino. Considerando que diversas amostras são caracterizadas por processo de sericitização de seus feldspatos (observação feita durante análise petrográfica), a autora não interpreta que estas amostras representem rochas alcalina. Apesar de algumas amostras apresentarem mineral semelhante a anfibólio sódico (arfvedsonita, possivelmente) em sua moda, não possuem quantidades anômalas de  $\text{Na}_2\text{O}$  quando suas composições químicas são analisadas (vide tabela de litogeoquímica, Apêndice D). Estas três amostras (CN-MT-02C, SC-15 e CN-ON-03B) exibem, no entanto, quantidades anômalas de  $\text{K}_2\text{O}$  (5,92%, 6,71% e 7,58%, respectivamente) quando comparadas às demais amostras da Suíte Intrusiva Santa Clara, mesmo as demais que possuem anfibólio aparentemente sódico na moda. A figura 10b mostra que os litotipos analisados exibem caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso; duas amostras representam exceções: SC-14E e CN-ON-02C, que aparentemente teriam caráter peraluminoso, porém não foram observados minerais tipicamente encontrados em granitos peraluminosos em qualquer amostra.

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.  $SiO_2$



Fonte: LE MAITRE et al., 1989; MANIAR E PICCOLI, 1989; LAMEYRE, 1987.

### 4.3 Geoquímica Multielementar

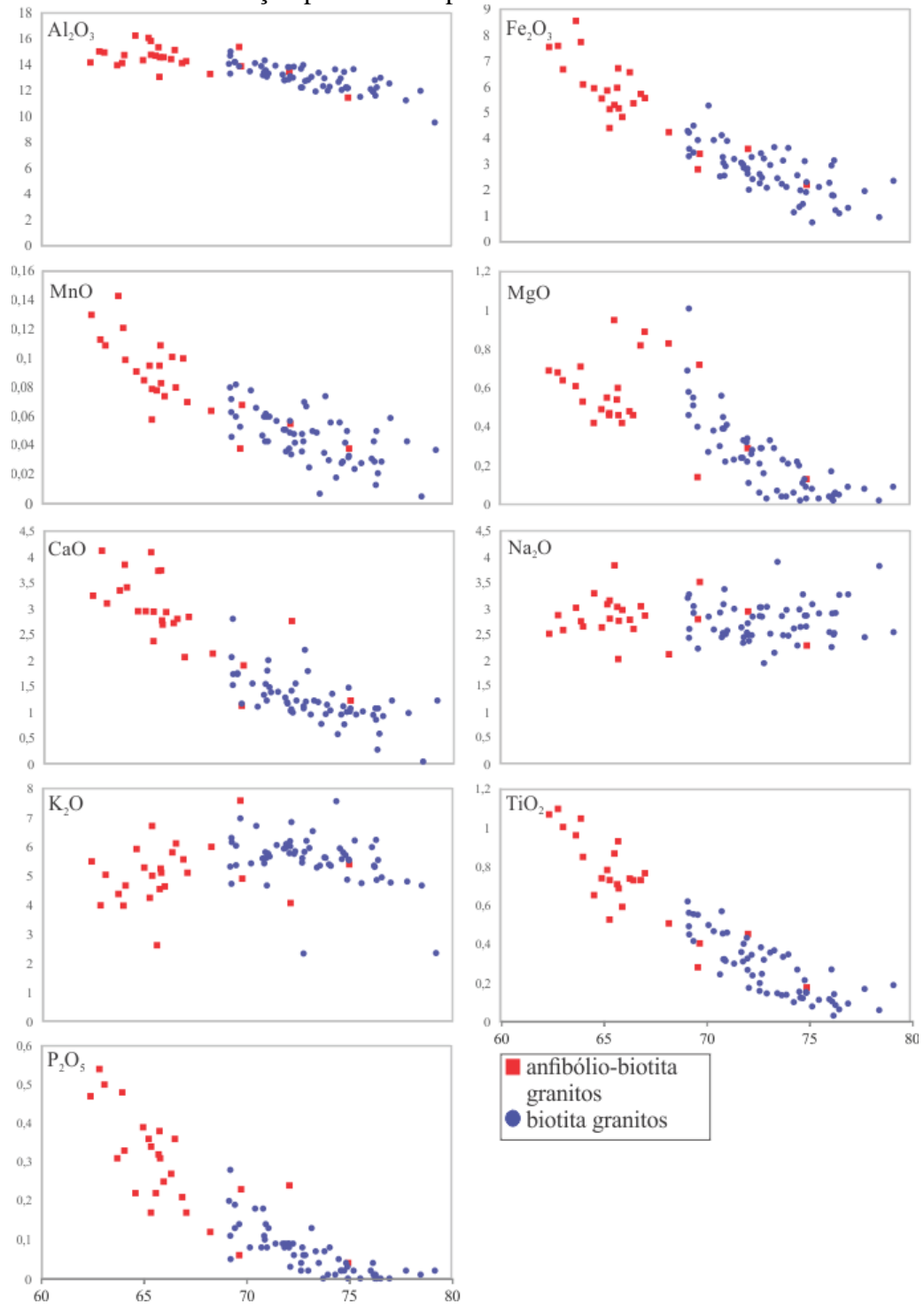
Como colocado por Nogueira (2012), diagramas bivariantes representam ferramentas bastante úteis para a identificação de processos petrogenéticos como cristalização fracionada (com ou sem assimilação), mistura entre magmas e fusão parcial, além de permitir a caracterização de fontes de magmas.

Nos diagramas bivariantes apresentados a seguir, SiO<sub>2</sub> foi utilizada como índice de diferenciação, visto que as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara são intermediárias a ácidas (vide Apêndice C). Analisando os diagramas (Figuras 11 e 12), nota-se que os litotipos amostrados definem *trends* lineares sem *gaps* composicionais significativos, apesar de um pequeno *gap* ser notado em diagramas com óxidos como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>. Este pequeno *gap* refere-se a um intervalo entre os valores de 67,06 e 68,23% de SiO<sub>2</sub>, porém a autora não considera este um verdadeiro *gap* composicional, como os comumente descritos na literatura. Como será colocado mais adiante no capítulo de “Discussões”, a autora defende uma natureza híbrida para o grupo de anfibólio-biotita granitos, ainda que a análise dos diagramas bivariantes não indique *gaps* composicionais, característica comum em processos de mistura magmática e hibridização. A autora acredita que em uma situação onde há predomínio do *end member* félsico, com poucas quantidades de *end member* máfico participando da mistura, é possível que as rochas híbridas possuam composições mais próximas do *end member* félsico. Outras características (petrográficas, geoquímicas e isotópicas) devem ser levadas em consideração no estudo de possíveis processos petrogenéticos responsáveis pela geração de um grupo específico de rochas.

Uma análise dos diagramas bivariantes para os óxidos (Figura 11) mostra que os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara caracterizam-se por uma correlação negativa de todos os óxidos, com exceção do Na<sub>2</sub>O, que exibe certa dispersão, e K<sub>2</sub>O, que apresenta correlação ligeiramente positiva, apesar de também haver alguma dispersão de dados. Quanto aos elementos-traço (Figura 12), correlações negativas são observadas para Ba, Sr, Zr, V e Sc e correlações positivas para elementos como Y, Rb e Th. Algumas amostras do grupo de biotita granitos exibem teores de V abaixo do limite de detecção, mas ainda assim é possível notar uma clara correlação negativa deste elemento-traço em relação à SiO<sub>2</sub>. É interessante notar que as rochas do grupo de anfibólio-biotita granitos apresentam comportamento geoquímico distinto daquele observado para as rochas do grupo de biotita granitos. As rochas com anfibólio são notadamente mais enriquecidas em Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ba,

Sr, Zr, V e Sc quando analisadas em conjunto com todos os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara. É importante ressaltar que dentro do grupo de biotita granitos há amostras que se destacam pelo enriquecimento em Sr, Y e V.

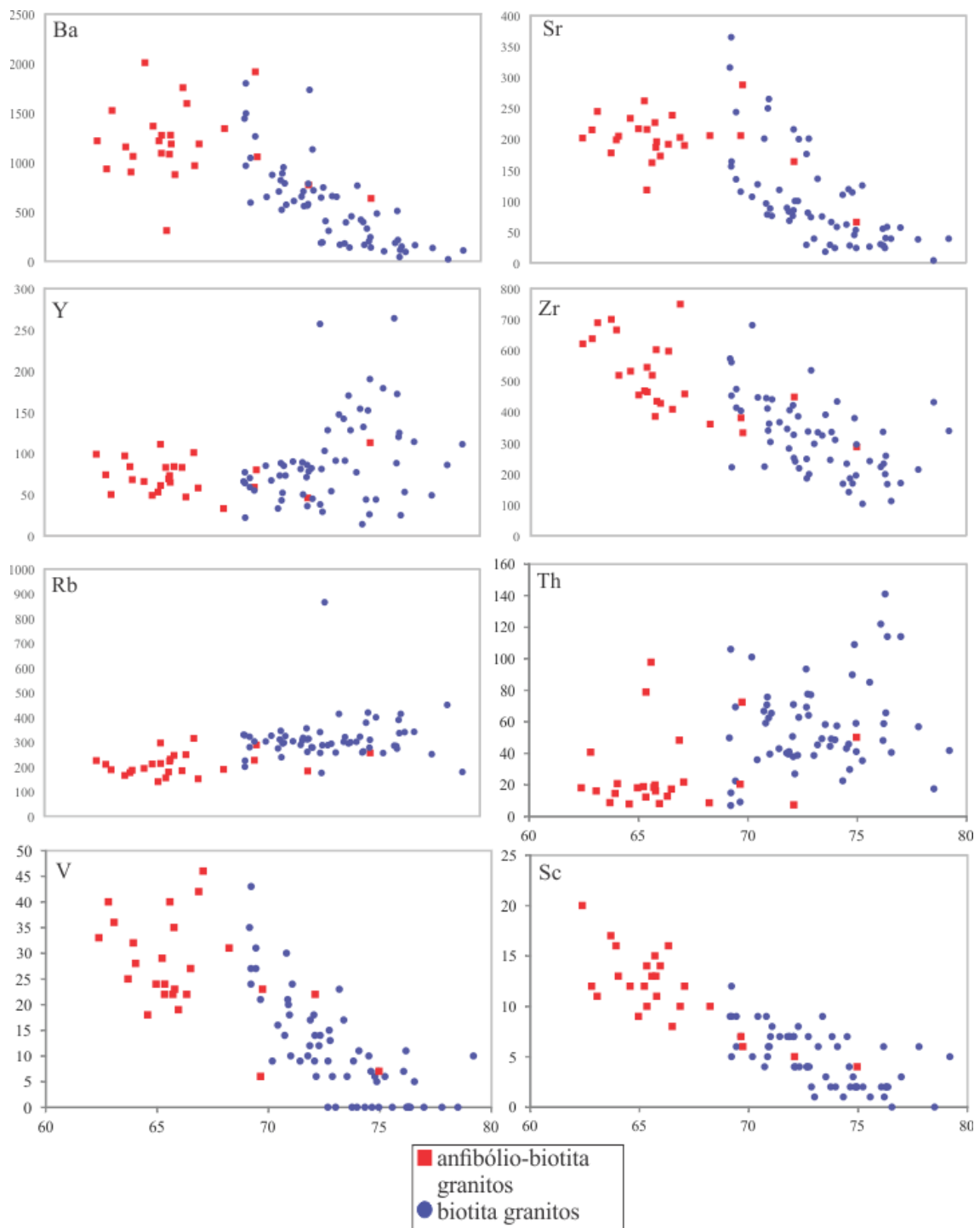
Figura 11 - Diagramas bivariantes para óxidos maiores com a  $\text{SiO}_2$  como índice de diferenciação para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara



Nota: Todos os valores estão expressos em % peso.

Fonte:: A autora, 2016

Figura 12 – Diagramas bivariantes para elementos-traço com SiO<sub>2</sub> como índice de diferenciação para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara



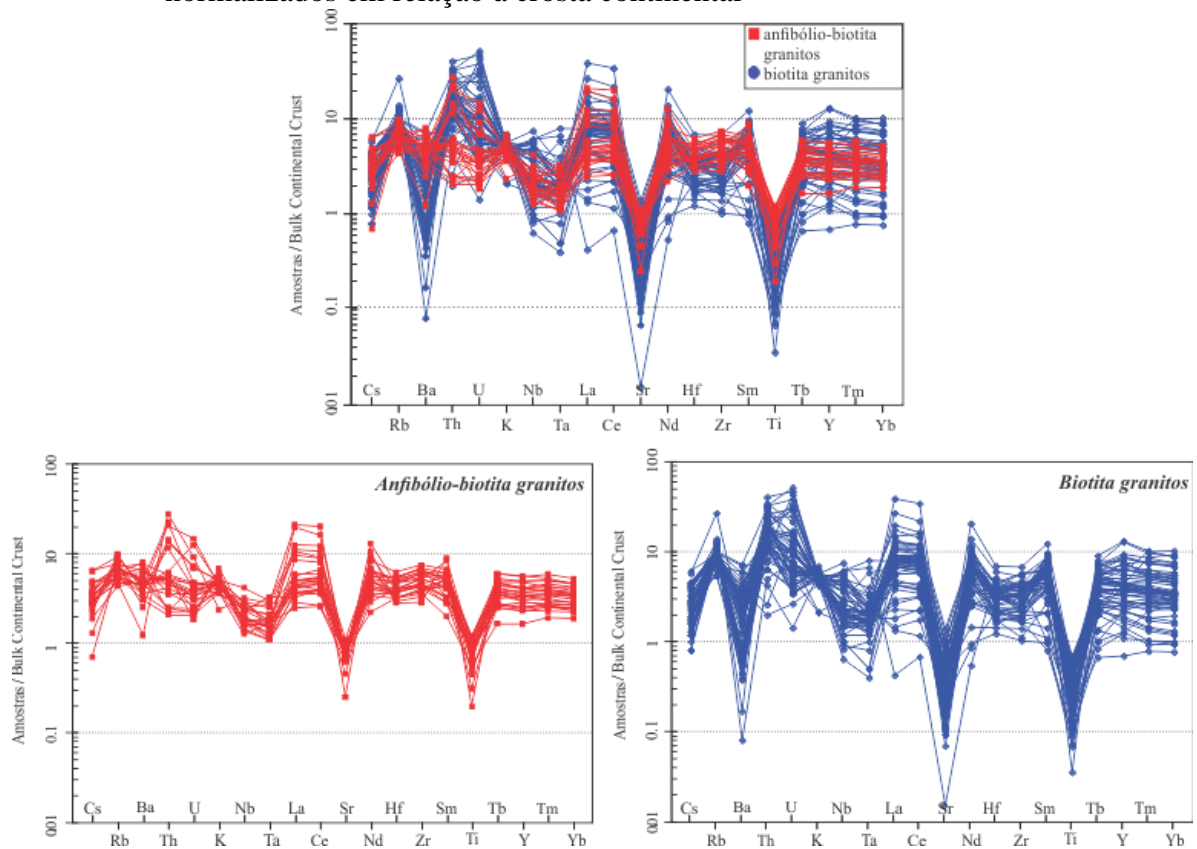
Nota: Valores expressos em % peso.

Fonte: A autora, 2016

Nos diagramas multielementares normalizados (Figura 13), nota-se que apesar de haver alguma sobreposição entre os padrões de diversos elementos, as amostras do grupo de biotita granitos exibem fortes anomalias negativas de Ba, Sr e Ti que contrastam com os padrões destes mesmos elementos no grupo de anfibólio-biotita granitos, que nem mesmo

exibem anomalias negativas de Ba. Os biotita granitos também exibem anomalias negativas mais pronunciadas de Nb e Ta, são mais enriquecidos em Th e U, e algumas amostras exibem elevados conteúdos de La, Ce e Y, o que provavelmente deve-se à presença de allanita na assembleia mineralógica destas rochas. De acordo com Clemens et al. (2009), anomalias negativas de Nb e Ta são compatíveis com fontes influenciadas por processos de subducção. As anomalias negativas de elementos como Sr, Ba e Ti verificadas nas amostras de biotita granitos sugerem fracionamento de plagioclásio, K-feldspato, biotita, titanita, magnetita e ilmenita. Já o enriquecimento em U e Th provavelmente está relacionado à ocorrência de allanita e zircão na moda deste grupo de rochas.

Figura 13 - Diagramas multielementares para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara normalizados em relação à crosta continental

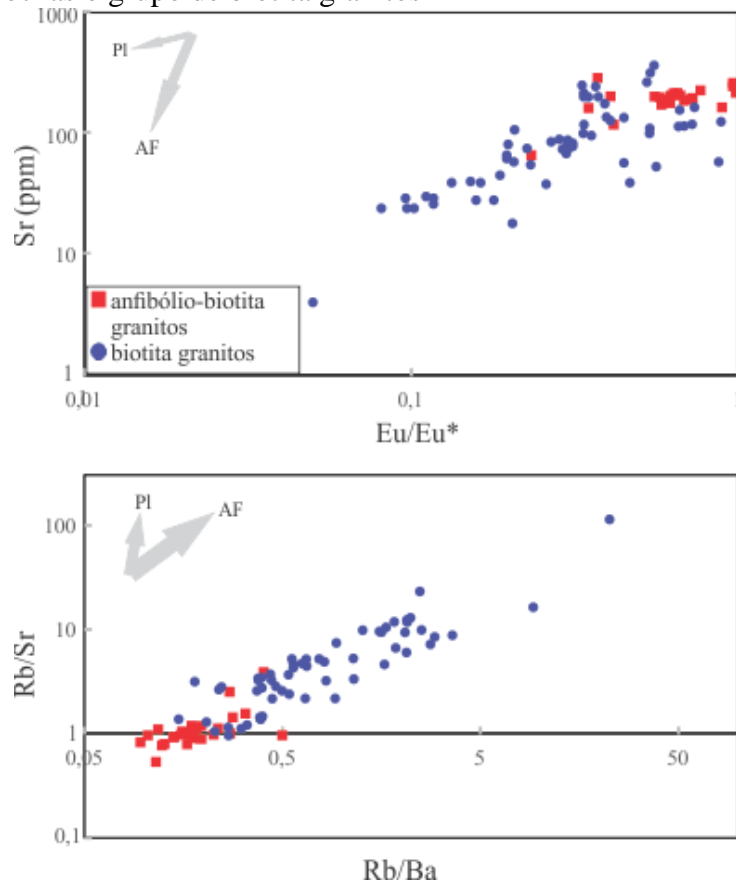


Fonte: TAYLOR & MCLENNAN, 1995

Nos diagramas  $Eu/Eu^*$  vs. Rb e Rb/Ba vs. Rb/Sr (Figura 14) propostos por Tollo et al. (2004), é possível notar que de maneira geral as amostras do grupo de anfibólio-biotita granitos não mostram *trends* de fracionamento e tendem a se apresentar como um pequeno *cluster*, o que poderia ser resultado de processo de mistura magmática. Já as amostras que fazem parte do grupo de biotita granitos exibem nítido *trend* de fracionamento de K-feldspato

em ambos os diagramas apresentados, mostrando que este mineral teve papel importante ao longo da evolução destes granitoides.

Figura 14 – Diagramas  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  vs. Sr e  $\text{Rb}/\text{Ba}$  vs;  $\text{Rb}/\text{Sr}$  para os litotipos da Suite Intrusiva Santa Clara, mostrando a importância do fracionamento de álcali-feldspato (AF) nas rochas o grupo de biotita granitos



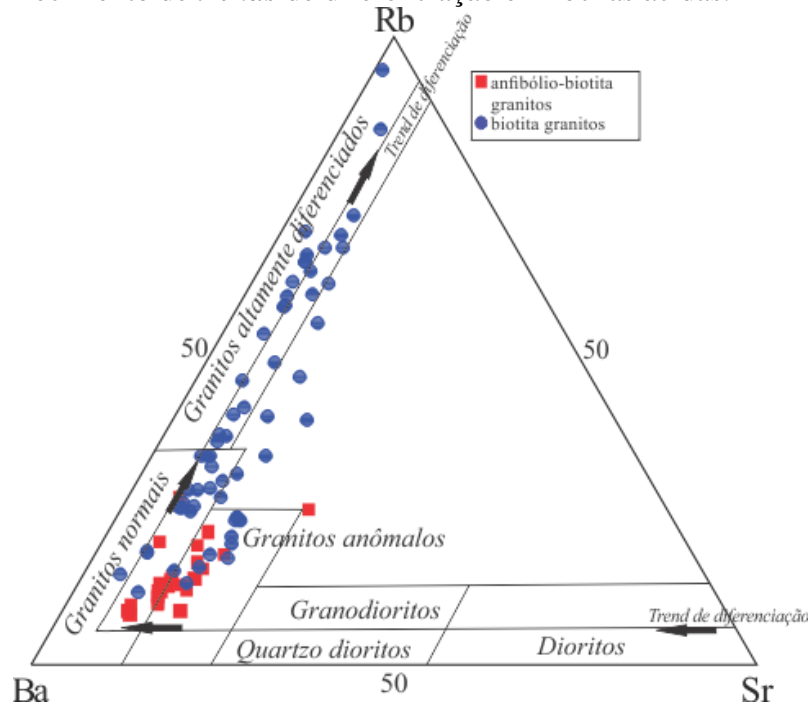
Legenda: Pl = plagioclásio.  
Fonte: TOLLO et al. (2004)

El Bouseily e El Sökkari (1975) propuseram um diagrama ternário envolvendo elementos como Rb, Ba e Sr a fim de melhor reconhecer *trends* de diferenciação para rochas ácidas. Segundo os autores, “granitos normais” seriam caracterizados pela distribuição normal destes três elementos, tendo como referência granitos de baixo-Ca de Turekian e Wedepohl (1961). A elevada concentração em Ba estaria relacionada a K-feldspatos de alta temperatura em granitos e representaria composições menos evoluídas. Granitos anômalos exibem uma distribuição um tanto quanto anômala de Rb, Ba e Sr e segundo El Bouseily e El Sökkari (1975) representam tipos que sofreram processos metassomáticos. O campo dos granitos altamente diferenciados caracteriza-se pelo enriquecimento em Rb. O diagrama da figura 15 mostra que as rochas do grupo de anfibólio-biotita granitos concentram-se



predominantemente na área do campo de granitos anômalos. Já os biotita granitos exibem um *trend* de evolução que vai de granitos normais a granitos altamente diferenciados; algumas poucas amostras plotam no campo de granitos anômalos e algumas outras amostras parecem não plotar em campo algum.

Figura 15 – Diagrama ternário Rb-Ba-Sr proposto por Bouseily and Sokkari (1975) para reconhecimento de *trends* de diferenciação em rochas ácidas.



Legenda: Nota-se que os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara distribuem-se entre os campos de granitos anômalos, granitos normais e granitos altamente diferenciados.

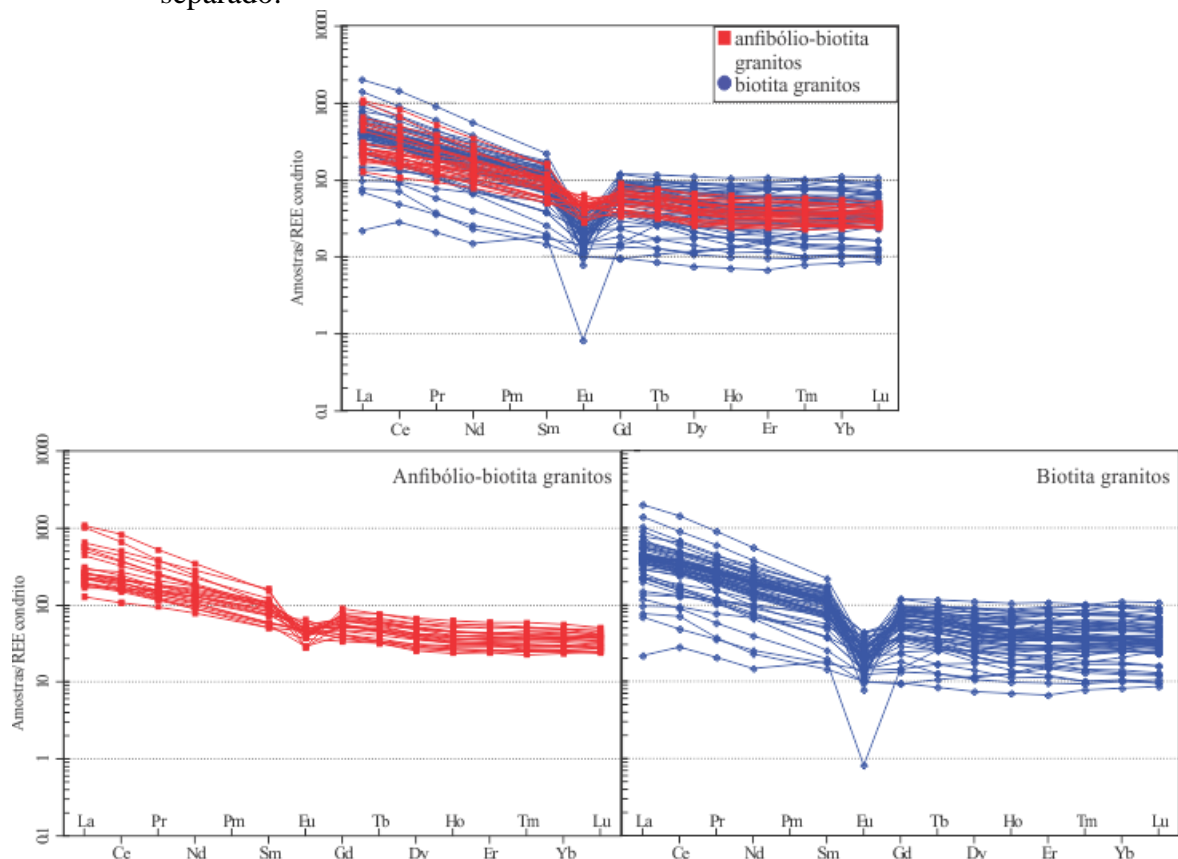
Fonte: BOUSEILY and SOKKARI, 1975

Os litotipos pertencentes ao grupo de anfibólio-biotita granitos exibem os menores conteúdos de  $\text{SiO}_2$  verificados, variando entre 62,38% e 74,96% e valores de elementos terras raras (ETR) que variam bastante, entre 211,55 e 1369,81 ppm. Os valores de ETR normalizados pelo condrito de Boynton (1984) mostram que os quartzo monzonitos (anfibólio-biotita granitos) têm fracionamento leve a moderado, com valores de  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  entre 3,73 e 34,36 e valor médio de 9,40. Além disso, também exibem anomalia negativa de európio, com razões  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  entre 0,23 e 0,99; a exceção é amostra CN-MT-02C, com valor de  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  igual a 1,47, o que provavelmente representa um erro de processamento da amostra, já que é possível que uma quantidade inadequada de fenocristais de K-feldspato tenha sido analisada. O diagrama de ETR normalizados (Figura 16) mostra uma comparação entre as rochas dos grupos de anfibólio-biotita granitos e biotita granitos, evidenciando as diferenças entre seus padrões. O grupo de quartzo monzonitos exibe anomalias negativas de

europio menos pronunciadas do que aquelas observadas para os biotita granitos. As amostras do grupo de biotita granitos exibem teores de  $\text{SiO}_2$  mais elevados, indo de 69,15% até 79,20% e valores de ETR variando entre 103,04 e 2324,67. Os valores de ETR normalizados pelo condrito de Boynton (1984) mostram que estes granitos têm fracionamento leve a moderado, com razão  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  entre 0,22 e 52,10 e valor médio de 14,16. Exibem anomalia negativa de európio, com valores de  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  entre 0,05 e 0,89, indicando anomalias negativas mais pronunciadas do que os anfibólio-biotita granitos. Os biotita granitos são, portanto, caracterizados por fracionamento mais intenso de plagioclásio.

Os padrões de ETR indicam que os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara apresentam enriquecimento moderado de ETRL em relação aos ETRP, o que pode ser controlado por fases minerais como hornblenda, ilmenita, titanita e zircão, que tendem a reter ETRs médios e pesados.

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.



Legenda: Valores normalizados pelo condrito.

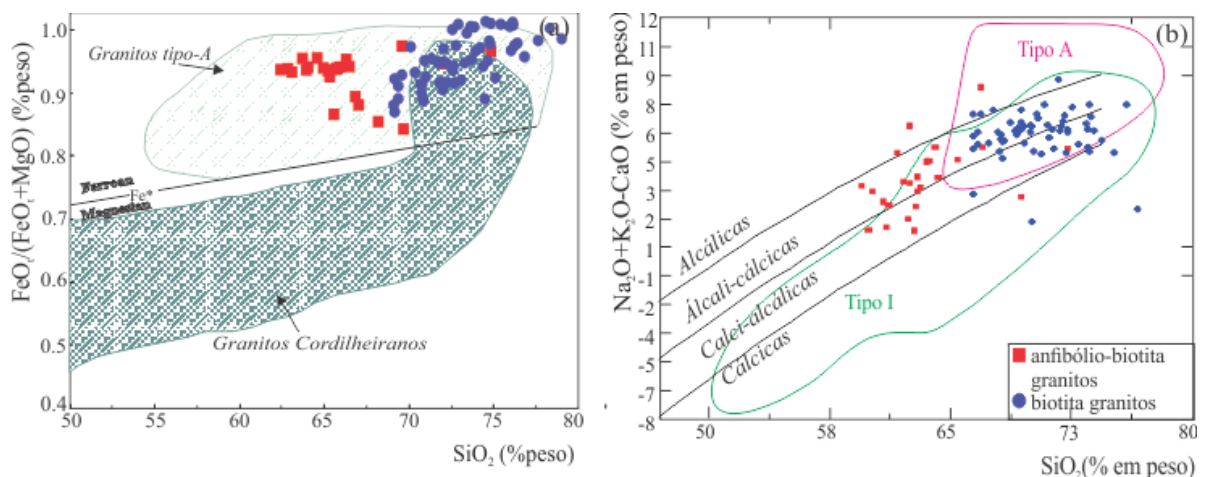
Fonte: BOYNTON, 1984.

#### 4.4 Fontes e Ambientes Tectônicos

Quanto ao ambiente tectônico de geração, as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara exibem características geoquímicas compatíveis com aquelas descritas para granitos tipo-A. As rochas do grupo de anfibólio-biotita granitos, geoquimicamente classificadas como quartzo monzonitos, exibem razões  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t + \text{MgO})$  entre 0,83 e 0,95, valores compatíveis com aqueles propostos por Frost et al. (2001) para granitos tipo-A “ferroan”. As rochas do grupo de biotita granitos exibem razões  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t + \text{MgO})$  entre 0,85 e 0,99, e também são classificadas como “ferroan” (Figura 17a). É possível observar que, de maneira geral, as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara concentram-se no campo de granitos tipo-A.

Em uma tentativa de apresentar uma nova classificação geoquímica para rochas graníticas, Frost et al (2001) também usam o chamado MALI, índice modificado do “*index-lime*” (“índice de álcalis”), de Peacock (1931) vs.  $\text{SiO}_2$ . Segundo a classificação proposta pelos autores, os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara são predominantemente alcali-cálcicos a calci-alcálicos (Figura 17b). As amostras de biotita granitos concentram-se no campo proposto para granitos tipo-A e as amostras de quartzo monzonitos (anfibólio-biotita granitos) apresentam maior dispersão, plotando fora do campo de granitos tipo-A; algumas plotam no campo de granitos tipo-I e outras fora de qualquer campo.

Figura 17 – Diagramas para os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara.



Legenda: (a)  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t + \text{MgO})$  vs.  $\text{SiO}_2$ ; em comparação com campos para granitos cordilheiranos e granitos tipo-A; (b)  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$  vs.  $\text{SiO}_2$  (MALI), em comparação com campos para granitos tipo-A e granitos tipo-I.

Fonte: FROST et al., 2001; ANDERSON e BENDER, 1989

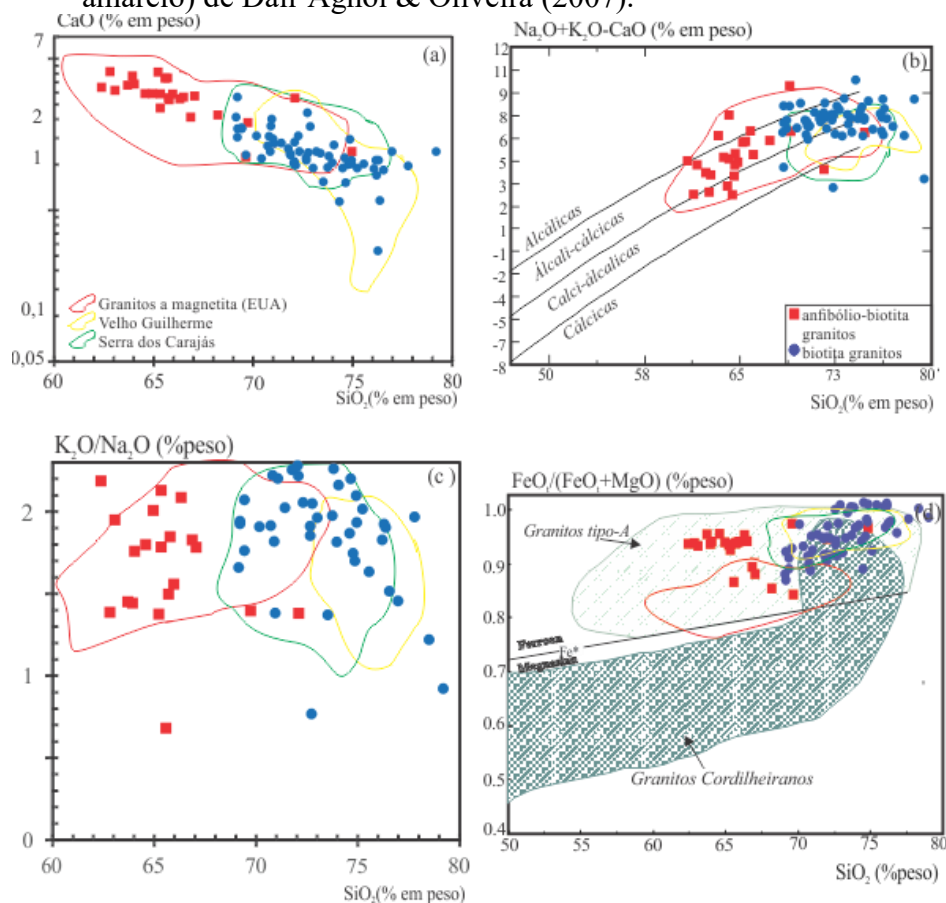
De acordo com Frost e Frost (2011), oito diferentes famílias de granitoides *ferroan* podem ser distinguidas considerando sua química de elementos maiores. Estas famílias incluem granitoides alcálicos que podem ser metaluminosos ou peralcalinos, granitoides álcali-cálcicos metaluminosos, peraluminosos ou ainda peralcalinos, granitoides cálcio-alcálicos metaluminosos ou peraluminosos ou raros granitoides cálcicos. Segundo estes autores, dois processos podem ser os responsáveis pela geração de granitos do tipo *ferroan*: uma teoria sugere que estes granitoides seriam magmas residuais de processo de cristalização fracionada de *melts* toleíticos (FROST & FROST 1997; FROST & FROST, 2011). Outro processo capaz de gerar granitoides *ferroan* leva em consideração a fusão parcial de rochas quartzo-feldspáticas magnesianas sob condições de baixa pressão, porém em sistemas naturais é comum que estes dois processos ocorram juntos. Assim, há granitoides que mostram evidências de assimilação crustal associados a rochas basálticas que sofreram extensa diferenciação. A associação entre granitos *ferroan* e rochas basálticas e as elevadas temperaturas magmáticas calculadas para estes granitoides ( $>900^{\circ}\text{C}$ ; CREASER et al., 1991; PATIÑO DOUCE, 1997) sugerem a participação de magmas máficos quentes no sistema, seja apenas fornecendo o calor necessário para gerar fusão crustal ou participando de maneira mais ativa, através de processos de diferenciação e assimilação.

Como observado anteriormente, os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara correspondem a composições predominantemente álcali-cálcicas, apesar de algumas amostras serem calci-alcálicas. Batólitos álcali-cálcicos exibem maior variação nos conteúdos de  $\text{SiO}_2$  e em alguns casos são interpretados como resultado de misturas incompletas entre magmas basálticos e magmas félsicos, como os monzonitos dos batólitos Sherman e San Isabel, na região sudoeste dos Estados Unidos. A principal diferença entre os tipos metaluminosos e peraluminosos nestes batólitos álcali-cálcicos seria a proporção de crosta félsica assimilada, sendo que os tipos peraluminosos teriam maior participação desta (FROST et al., 1999; FROST & FROST, 2011). Já os batólitos que possuem granitoides *ferroan* calci-alcálicos normalmente exibem teores de  $\text{SiO}_2$  mais elevados ( $>70\% \text{SiO}_2$ ) e composições metaluminosas a peraluminosas. Um exemplo de batólito deste tipo inclui granitoides paleoproterozoicos da Província Carajás, no Cráton Amazônico. As rochas estudadas por Dall’Agnol e Oliveira (2007) compreendem granitos rapakivi à magnetita e oxidados que teriam sido gerados a partir da fusão de fontes quartzo-feldspáticas sob condições oxidantes e com clinopiroxênio como fase residual importante.

A figura 18 mostra uma comparação entre os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara e campos de amostras compiladas por Dall’Agnol e Oliveira (2007), incluindo granitos à

magnetita dos Estados Unidos (em vermelho), amostras de granitos da Serra do Carajás (em verde) e amostras de granitos da Suíte Velho Guilherme (em amarelo). Segundo os autores, os granitos da Serra do Carajás exibem caráter reduzido moderado e os granitoides que fazem parte da Suíte Velho Guilherme exibem caráter reduzido, com predomínio de ilmenita na moda. Comparando as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara com os granitoides da Serra dos Carajás e da Suíte Velho Guilherme é possível notar que as amostras de anfibólio-biotita granitos assemelham-se bastante aos granitos à magnetita americanos e as amostras de biotita granitos são mais compatíveis com o campo dos granitoides da Serra dos Carajás, de caráter moderadamente reduzido, apesar de haver certa superposição com o campo correspondente aos granitoides reduzidos da Suíte Velho Guilherme.

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).



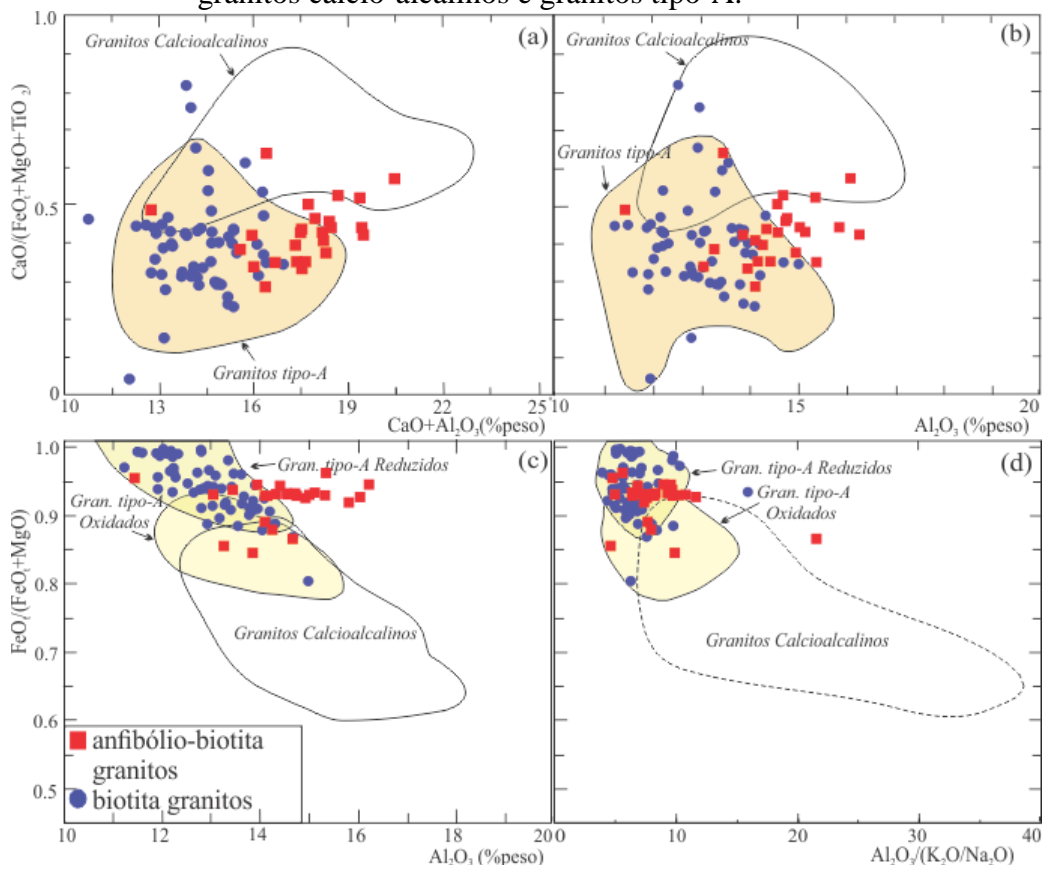
Legenda: (a) CaO vs. SiO<sub>2</sub>; (b) Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-CaO vs. SiO<sub>2</sub>; (c) K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub>; (d) FeO<sub>T</sub>/(FeO<sub>T</sub>+MgO) vs. SiO<sub>2</sub>; valores em peso de óxido.

Fonte: FROST et al., 2001; DALL’AGNOLI e OLIVEIRA, 2007

Em uma tentativa de caracterizar as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara em termos de caráter reduzido ou oxidado, a autora utilizou outro conjunto de diagramas propostos por Dall'Agnol & Oliveira (2007). A figura 19 mostra que de maneira geral as rochas analisadas são quimicamente compatíveis com granitos tipo-A (Figuras 19a,b), apesar de algumas amostras plotarem fora deste campo. Observando os demais diagramas (Figuras 19c,d) parece razoável sugerir que as amostras do grupo de biotita granitos exibem caráter moderadamente reduzido a reduzido; já as amostras de anfibólio-biotita granitos mostram dispersão e não plotam em um campo específico (Figura 19c), apesar de aparentemente plotarem no campo de granitos tipo-A oxidados, mesmo com superposição em relação ao campo de granitos tipo-A reduzidos.

A autora teve a oportunidade de fazer algumas análises de química mineral em ocasião de viagem à cidade de Turku, na Finlândia, em maio de 2015. As análises foram feitas no *Åbo Akademi Process Chemistry Centre* e opacos de quatro amostras foram analisados. Cristais individuais de magnetita foram registrados apenas na amostra CN-MT-06A (grupo de anfibólio-biotita granitos) e ilmenita foi observada em associação com magnetita nas amostras CN-MT-02D, CN-MT-06B e CN-JC-01A, sendo esta última do grupo de biotita granitos. Esta associação ocorre da mesma maneira que foi descrita nas lâminas petrográficas, ou seja, um aglomerado de minerais máficos, incluindo anfibólio (quando há), biotita e opacos com titanita. Nas amostras do grupo de anfibólio-biotita granitos é provável que a titanita anédrica seja gerada às expensas dos minerais opacos. Como descrito acima, em algumas amostras magnetita e ilmenita ocorrem juntas, associadas. Assim, é possível que na realidade algumas amostras de biotita granitos sejam moderadamente reduzidas, já que estas não exibem quantidades apreciáveis de titanita na moda, mas é possível que outras amostras deste grupo também tenham a associação magnetita + ilmenita, ao invés de apenas ilmenita, o que seria esperado em granitos reduzidos. Já as amostras do grupo de anfibólio-biotita granitos exibem quantidades bastante razoáveis de titanita em sua moda, além da associação magnetita + ilmenita registrada nas análises de química mineral. As rochas deste grupo também apresentam titanita euédrica, indicando que esta fase foi precoce durante a evolução do líquido e portanto cristalizada a partir de uma fonte relativamente oxidada. Finalmente, a autora propõe que as rochas do grupo de anfibólio-biotita granitos tenham caráter mais oxidado, enquanto as rochas do grupo de biotita granitos provavelmente têm caráter moderadamente reduzido a reduzido.

Figura 19 - Diagramas (a)  $\text{CaO}/(\text{FeO}_t+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$  vs.  $(\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3)$ ; (b)  $\text{CaO}/(\text{FeO}_t+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (c)  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (d)  $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$  para as rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara analisadas, em comparação com campos para granitos cálcio-alcálicos e granitos tipo-A.

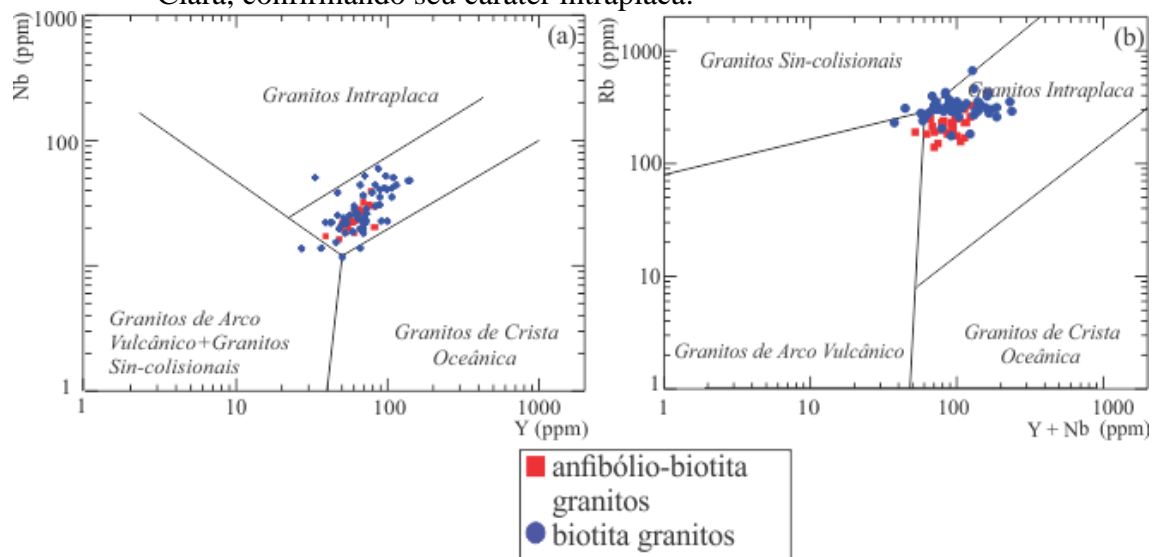


Legendas: Os diagramas (c) e (d) mostram também campos de granitos tipo-A oxidados e reduzidos. O campo de granitos cálcio-alcálicos é baseado em dados de Frost et al. (2001), e os demais campos são baseados em dados publicados por Dall'Agnol e Oliveira (2007).

Fonte: FROST et al., 2001; DALL'AGNOL e OLIVEIRA, 2007

Os diagramas discriminantes de ambientes tectônicos (PEARCE et al., 1984; Figura 20a,b) mostram que os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara analisados distribuem-se no campo de rochas geradas em ambiente intraplaca.

Figura 20 - Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos para os quartzos monzonitos (anfíbólio-biotita granitos) e granitos (biotita granitos) da Suíte Intrusiva Santa Clara, confirmando seu caráter intraplaca.

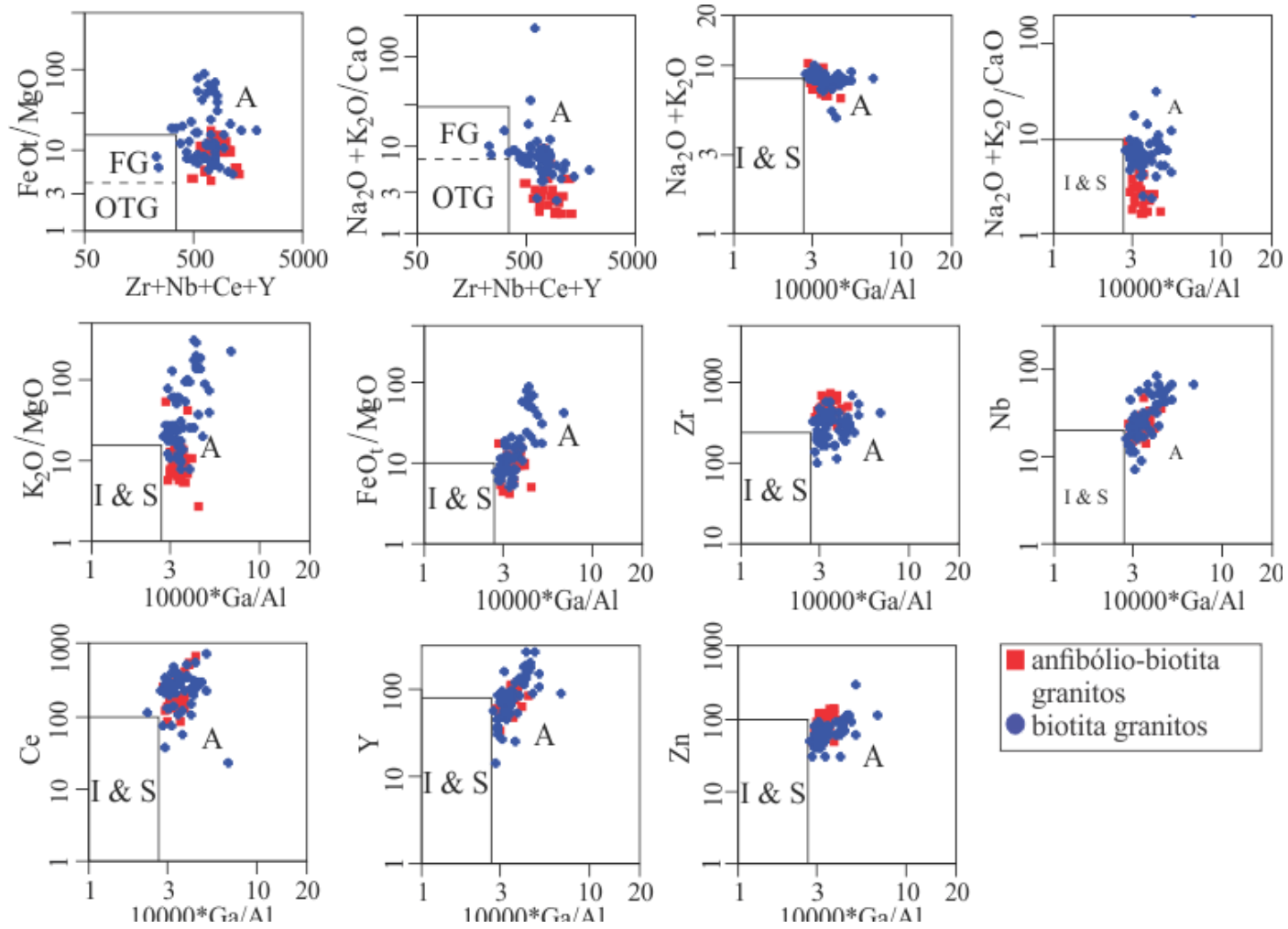


Fonte: PEARCE et al., 1984

Whalen et al. (1987) propuseram diagramas discriminantes para granitos tipo-A considerando que este tipo de rocha é mais enriquecido em Fe, K+Na, Ga, Nb, Y, Zr e elementos terras raras (ETR). Segundo estes autores, granitos tipo-A exibem elevadas razões Ga/Al que quando plotadas contra elementos maiores e elementos traços os distinguem de granitoides tipos I, M e S. No entanto, os autores deixam claro que estas diferenças são mais pronunciadas em granitos tipo-A alcalinos a paracalinos e menos pronunciadas em amostras subalcalinas, caso dos litotipos estudados nesta tese. Os diagramas discriminantes para granitoides de Whalen et al. (1987) confirmam o caráter tipo-A dos litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara (Figura 21). É nítido que em alguns diagramas há uma separação entre os agrupamentos de amostras ( $Zr+Nb+Ce+Y$  vs.  $Na_2O+K_2O/CaO$ ,  $10000*Ga/Al$  vs.  $Na_2O+K_2O/CaO$ ,  $10000*Ga/Al$  vs.  $K_2O/MgO$ ), o que pode ser reflexo de fontes distintas ou processos petrogenéticos distintos. Algumas poucas amostras do grupo de biotita granitos plotam no campo de granitos fracionados (FG) e são representadas pelos pontos SC-02C e CN-JC-07A, que exibem teores de  $SiO_2$  iguais a 74,60% e 75,23% e de fato satisfazem a condição  $4 < FeOt/MgO < 16$  proposta por Bonin (2007) para granitos fracionados, já que exibem valores desta razão de 6,75 e 9,38, respectivamente.



Figura 21 - Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos para os granitoides analisados nesta dissertação.



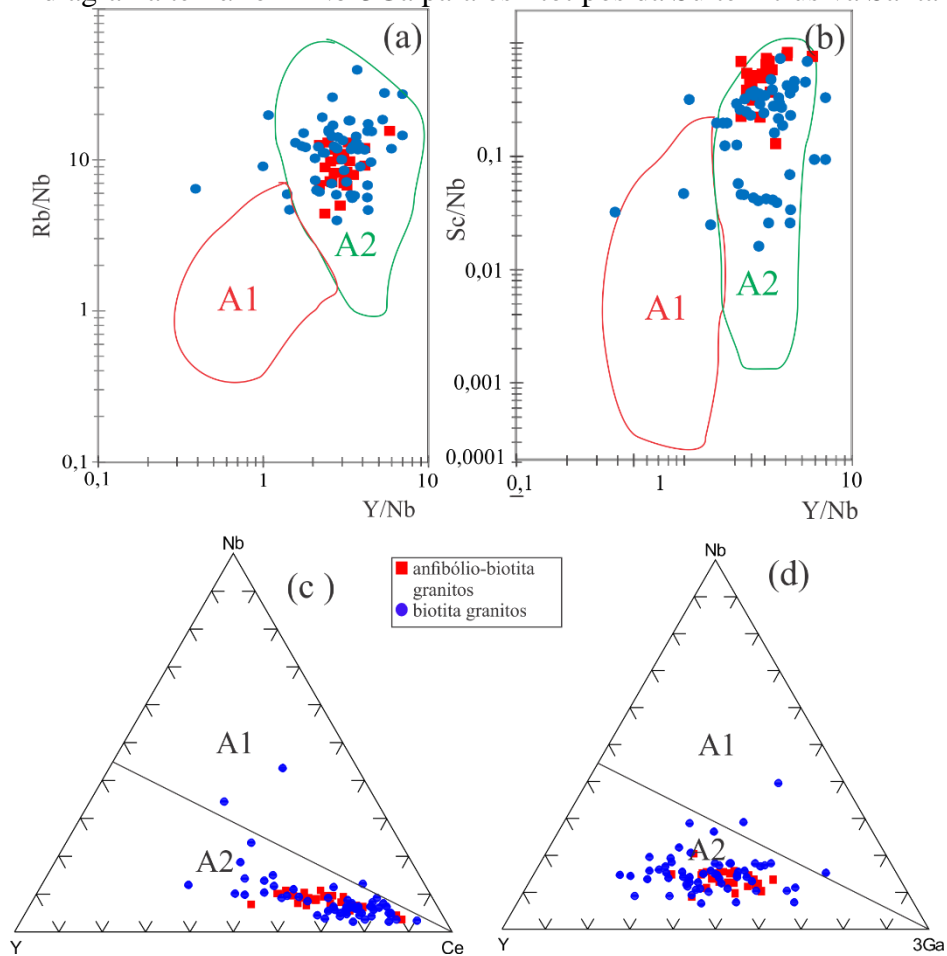
Legenda: **I&S**: Granitos tipo-I e Granitos tipo-S; **A**: Granitos tipo-A; **FG**: Granitos Fracionados e **OGT**: Granitos Comuns.

Fonte: WHALEN et al., 1987.

Eby (1992) propôs uma subdivisão para os granitoides tipo-A, dividindo-os em dois grupos distintos: granitoides do tipo A<sub>1</sub> exibem características geoquímicas semelhantes às observadas em basaltos de ilha oceânica e, portanto, seriam diferenciados de fontes como as deste tipo de basalto, porém relacionados a ambientes de *rifts* continentais ou magmatismo intraplaca. Já os granitoides do grupo A<sub>2</sub> são quimicamente compatíveis com derivação de fontes crustais, mas também são compatíveis com basaltos de arcos de ilhas. Este grupo de granitoides representa magmas derivados de fusão de crosta continental ou crosta *underplated* em ambientes de colisão continental ou magmatismo do tipo arco de ilhas. Segundo o autor, os granitoides do tipo A<sub>2</sub> representariam manifestações de magmatismo de fato anorogênico, a exemplo dos granitos rapakivi (EBY, 1992).

De acordo com os diagramas de Eby (1992) apresentados abaixo, os litotipos da Suíte Intrusiva Santa Clara são quimicamente compatíveis com granitoides do tipo A<sub>2</sub>, ou seja, granitoides associados a ambientes pós-colisionais a anorogênicos. Algumas poucas exceções seriam granitoides do tipo A<sub>1</sub> e há ainda algumas amostras que parecem não pertencer a nenhum dos campos (Figuras 22a,b).

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.



Legenda: A<sub>1</sub>: granioides tipo-A associados a *hotspots*, plumas e zonas de *rift* continental; A<sub>2</sub>: granioides tipo-A associados a ambientes pós-colisionais/pós-orogênicos e granitos anorogênicos propriamente ditos.

Fonte: EBY, 1992