



Cristalização Fracionada e Assimilação da Crosta Continental pelos Magmas de Rochas Alcalinas Félsicas do Estado do Rio de Janeiro
Fractionation Crystallisation and Continental Crust Assimilation by the Felsic Alkaline Rock Magmas of the State of Rio de Janeiro, Brazil

Susanna Eleonora Sichel ¹; Akihisa Motoki ²; Woldemar Iwanuch ²; Thais Vargas ²;
José Ribeiro Aires ³; Dean Pereira de Melo ⁴;
Kenji Freire Motoki ¹; Alex Balmant ² & Juliana Gonçalves Rodrigues ²

¹ Universidade Federal Fluminense, Laboratório de Geologia do Mar, Departamento de Geologia.
Avenida General Milton Tavares de Souza s/n, 4 andar, Gragoatá, 24210-340, Niterói, RJ.

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia, Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea.
Rua São Francisco Xavier 524, Bloco A, Sala 4023, Maracanã, 20550-990, Rio de Janeiro, RJ.

³ PETROBRAS - ABAST - Av. República do Chile, 65, sala 902, Centro, 20031-912, Rio de Janeiro, RJ.

⁴ PETROBRAS - CENPES - Avenida Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, 21941-915, Rio de Janeiro, RJ.

E-mails: susannasichel@id.uff.br; rochasornamentais@yahoo.com.br; hitecelements@gmail.com; thaisvargasuerj@gmail.com;
aires@petrobras.com.br; deanmelo@petrobras.com.br; kenji_dl@hotmail.com;

alexbalmant@yahoo.com.br; jg.uerj@gmail.com

Recebido em: 08/02/2012 Aprovado em: 19/03/2013

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2012_2_84_104

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo geral para a evolução magmática das rochas alcalinas félsicas do Estado do Rio de Janeiro. As rochas são nefelina sienito, álcali sienito, fonolito e traquito de caráter metalcalino das séries potássica e ultrapotássica. Os diagramas de variação composicional indicam a cristalização fracionada de clinopiroxênio, anfibólio, titanita, ilmenita e apatita. O fracionamento magmático para as rochas alcalinas máficas e intermediárias é caracterizado por cristalização de minerais máficos e, para as rochas alcalinas félsicas, por cristalização de leucita e feldspato alcalino. Através de cristalização fracionada, o magma alcalino félsico transforma sua composição de metalcalino para peralcalino e de potássico para sódico. O diagrama do SSI (*silica saturation index*) para as rochas alcalinas félsicas demonstra uma seqüência linear que cruza a barreira térmica, apontando um forte efeito de assimilação da crosta continental. A evolução magmática ocorre em três estágios: 1) Cristalização de leucita; 2) Cristalização de feldspato alcalino e nefelina; 3) Assimilação da crosta continental e consequente transformação da composição subsaturada em sílica em supersaturada. A taxa de assimilação é alta, chegando até 54%. Os eventos da assimilação ocorreram no Estágio 2, que sugere super-reaquecimento magmático e fusão da rocha encaixante, propondo a origem dos magmas com a composição termodinamicamente instável de álcali sienito e traquito.

Palavras-chave: nefelina sienito; cristalização fracionada; assimilação crustal

Abstract

This paper presents a general model for the magmatic evolution for the felsic alkaline rocks of the State of Rio de Janeiro, Brazil. The rocks are meta-alkaline nepheline syenite, alkaline syenite, phonolite, and trachyte of potassic and ultrapotassic series. The compositional variation diagrams indicate the fractionation crystallisation of clinopyroxene, amphibole, titanite, ilmenite, and apatite. The magmatic fractionation for the mafic and intermediate alkaline rocks is characterised by the crystallisation of leucite and alkaline feldspar, and for the felsic alkaline rocks, of leucite and alkaline feldspar. By means of fractionation crystallisation, the felsic alkaline magma changes its composition from meta-alkaline to peralkaline and from potassic to sodic. The SSI diagram (*silica saturation index*) for the felsic alkaline rocks presents a linear trend crossing over the thermal divide, pointing out a strong effect of continental crust assimilation. The magmatic evolution occurs in three stages: 1) Leucite crystallisation; 2) Alkaline feldspar and nepheline crystallisation; 3) Continental crust assimilation and consequent transformation of the silica-undersaturated composition into oversaturated one. The assimilation rate is high, reaching up to 54%. The assimilation events took place during the Stage 2, which suggests magma super-reheating and consequent wall rock partial melting, proposing the origin of alkaline syenite and trachyte magmas of thermodynamically unstable composition.

Keywords: nepheline syenite; fractionation crystallisation; crustal assimilation

1 Introdução

Dentre as amostras coletadas a partir de um mesmo vulcão ou um mesmo complexo intrusivo, existem certas variações geoquímicas. Essa é atribuída geralmente ao grau de cristalização fracionada. Outro fator importante é assimilação de parte da rocha encaixante. Rochas da crosta continental superior são félsicas e possuem composições similares àquela de um magma não alcalino altamente fracionado e, portanto ambos os processos têm resultados geoquímicos similares, tais como elevação de SiO_2 , Na_2O e K_2O e redução de MgO e CaO . Desta forma, é difícil discutir a evolução magmática distinguindo quantitativamente os efeitos de cristalização e assimilação (Rodrigues, 1978, 1982). Portanto, os dois processos são tratados coletivamente como AFC (*Assimilation Fractional Crystallisation*).

Por outro lado, no caso de rochas alcalinas félsicas, tais como de nefelina sienito e fonolito, o magma é subsaturado em sílica e a rocha encaixante é supersaturada. A cristalização fracionada induz o magma a ser menos saturado, porém com a assimilação da crosta continental, passa ser mais saturado, sendo do sentido oposto. Caso a rocha encaixante seja paragnaisse pelítico, um fenômeno similar é observado entre álcalis e alumina. Nestes casos, os efeitos da cristalização e assimilação podem ser distinguidos.

A assimilação da rocha encaixante supersaturada pelo magma subsaturado de nefelina sienito é um assunto polêmico. O magma nefelina sienítico está na zona de estabilidade termodinâmica de baixa temperatura. O magma gerado pela fusão da rocha encaixante tem composição granítica e está em outra zona de estabilidade termodinâmica de baixa temperatura. Devido à existência de barreira térmica entre as duas composições, a mistura física dos magmas não permite formar um magma de composição intermediária, que corresponde a álcali sienito e traquito devido à instabilidade termodinâmica. Devido à baixa temperatura, ocorre a cristalização de feldspato alcalino até que um dos dois componentes é consumido.

Em adição, o magma alcalino félsico possui comportamento peculiar na cristalização fracionada. No caso de magmas não alcalinos, os teores de Na e K aumentam conjuntamente através de cristalização fracionada. Entretanto, no caso do magma de nefelina sienito o teor de Na aumenta e de K baixa.

No Estado do Rio de Janeiro, ocorre uma dúzia de complexos intrusivos de rochas alcalinas félsicas

do Cretáceo ao Eoceno. Estes apresentam interessantes respostas sobre a evolução geoquímica do magma alcalino. O presente trabalho mostra composições químicas de elementos principais das rochas alcalinas félsicas com base nos dados do acervo dos autores e de novas análises realizadas e discute a relação entre a cristalização fracionada e assimilação. Concederá também sobre a gênese de álcali sienito e traquito, cuja composição está na zona de instabilidade termodinâmica.

2 Comportamentos Químicos de Rochas Alcalinas

A expressão “rochas alcalinas” é frequentemente encontrada na literatura geológica, porém definições exatas inerentes ao termo e comportamentos químicos ainda não estão bem compreendidos. Obviamente, as rochas alcalinas não são simplesmente aquelas que têm alto teor de álcalis, mas são relacionadas aos conceitos de saturação álcali sílica e álcali alumina.

Feldspatos são os minerais mais comuns nas rochas ígneas devido a sua estabilidade termodinâmica em profundidade da crosta superior. Os elementos Na, K, Ca e SiO_2 contidos no magma cristalizam prioritariamente como feldspato alcalino e plagioclásio. A maioria dos magmas tem sílica suficiente para essa cristalização. Portanto, o K, Na e Ca cristalizam feldspatos e o Fe e Mg cristalizam minerais máficos. Após a cristalização desses quando a sílica ainda sobra, é cristalizado como quartzo. Esta última composição é denominada supersaturada em sílica (*silica oversaturated*). Na Figura 1A, os magmas supersaturados estão no lado direito da crista de albita.

Por outro lado, existem poucos magmas com sílica insuficiente relativa as álcalis e, estes cristalizam minerais máficos e quantidade reduzida de feldspatos. Para compensar a insuficiência de sílica, cristalizam-se feldspatóides representados por nefelina. Essa composição é chamada de subsaturada em sílica (*silica undersaturated*). Na Figura 1A, os magmas subsaturados estão no lado esquerdo da albita. Os minerais de sílica, como quartzo, e os feldspatóides, como nefelina, não podem coexistir em equilíbrio. Esta relação é chamada de saturação álcali sílica. O magma supersaturado não evolui para magma subsaturado por cristalização fracionada e o vice versa. Este fenômeno é chamado de barreira térmica (*thermal divide*).

Um fenômeno similar é observado também entre álcalis e alumina. Na maioria dos magmas,

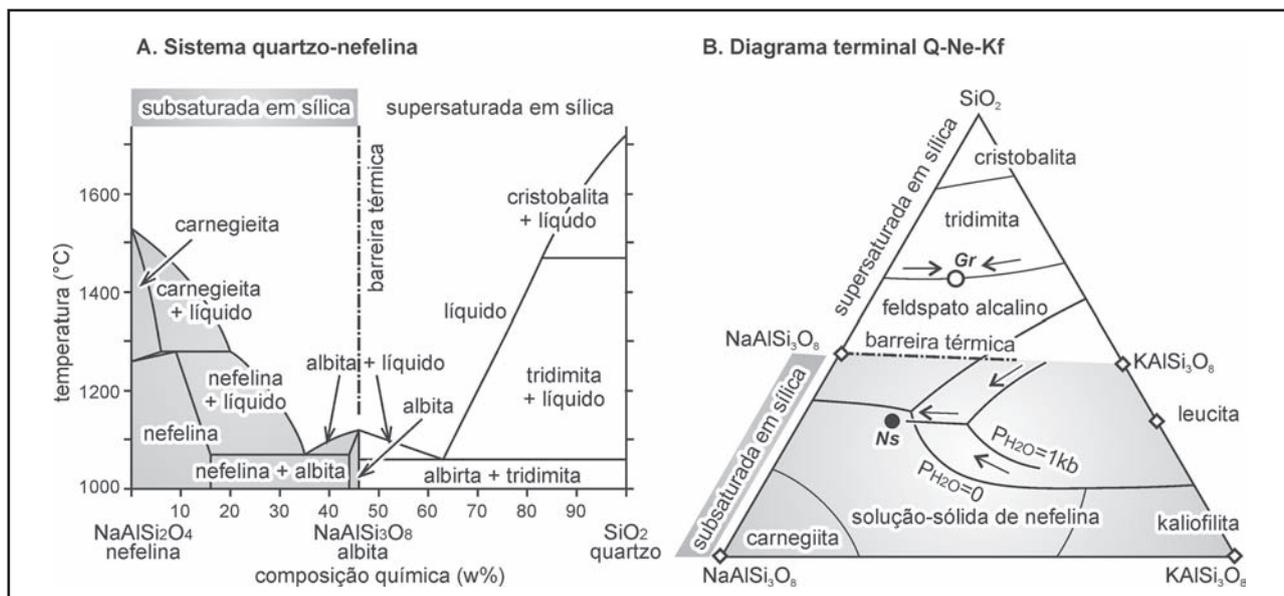


Figura 1 Saturação entre álcalis e sílica e barreira térmica: (A) Diagrama da fase entre $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - SiO_2 (Schairer & Bowen, 1956, reformulado por Miyashiro & Kushiro, 1977); (B) Diagrama do sistema residual de SiO_2 - $\text{NeAlSi}_3\text{O}_4$ - KAlSi_3O_4 (Schairer & Bowen, 1935, Hamilton & MacKenzie, 1960).

$\text{Na}+\text{K} < \text{Al}_{\text{mol}}$ e $\text{Na}+\text{K}+1/2\text{Ca} > \text{Al}_{\text{mol}}$, desta forma, Na, K e Ca cristalizam feldspato alcalino, plagioclásio, clinopiroxênio e anfibólio. Entretanto, existem poucos magmas com $\text{Na}+\text{K} > \text{Al}_{\text{mol}}$. Neste caso, mesmo consumindo inteiramente alumina cristalizando feldspato alcalino e feldspatóides, ainda sobram álcalis. Os álcalis sobrados constituem clinopiroxênio e anfibólio alcalinos, tais como egrina, egrina-augita, barquevikita e riebeckita. Devido à deficiência de Na, não cristaliza plagioclásio. Tal composição é chamada de peralcalina.

Por outro lado, existem os magmas de características a opostas, sendo de $\text{Na}+\text{K}+1/2\text{Ca} < \text{Al}_{\text{mol}}$. Neste caso, mesmo utilizando inteiramente Na, K e Ca para cristalizar feldspato alcalino e plagioclásio sobra ainda Al, que é utilizado para cristalizar muscovita. Tal composição é denominada peraluminosa. Os minerais característicos de composição peralcalina, como egrina, e peraluminosa, como muscovita, são incompatíveis em equilíbrio. A relação acima citada é denominada saturação álcali alumina. O magma peralcalino não evolui para magma peraluminoso e o vice versa.

A idéia acima citada foi proposta por Shand (1927). A saturação álcali sílica é bem conhecida no Brasil porém, a álcali alumina é pouco divulgada. Shand chamou as rochas ígneas com feldspatóides e minerais peralcalinos modais como rochas alcalinas, sendo esta a definição mineralógica desta categoria

(Figura 2A, B, C). Os exemplos são nefelina sienito e egrina fonolito. As rochas alcalinas segundo esta definição são muito raras no mundo.

Por outro lado, muitos geólogos chamam as rochas ígneas com feldspatóides e/ou minerais peralcalinos normativos de rochas alcalinas, sendo a definição geoquímica. Esta definição é importante para as discussões do presente trabalho e, abrange várias rochas ígneas do mundo, como álcali olivina basalto sem nefelina modal.

Quando uma província ígnea contém rochas alcalinas de definição mineralógica ou geoquímica, todas as rochas ígneas do mesmo evento magmático tendem a serem chamadas de rochas alcalinas, inclusive as rochas geoquimicamente não são alcalinas tais como, álcali sienito, quartzo sienito e traquito. As rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro estão de acordo com esta idéia, obedecendo à definição genética (Figura 2D).

3 Embasamento

O embasamento metamórfico da região litorânea do Estado do Rio de Janeiro é constituído principalmente por ortognaisse e paragnaisse do Terreno Oriental (*Oriental Terrane*). As rochas metamórficas têm direção geral do bandamento N50°E a N60°E e, a idade metamórfica é cambriana (e.g. Heilbron & Machado, 2003, Schmitt *et al.*,

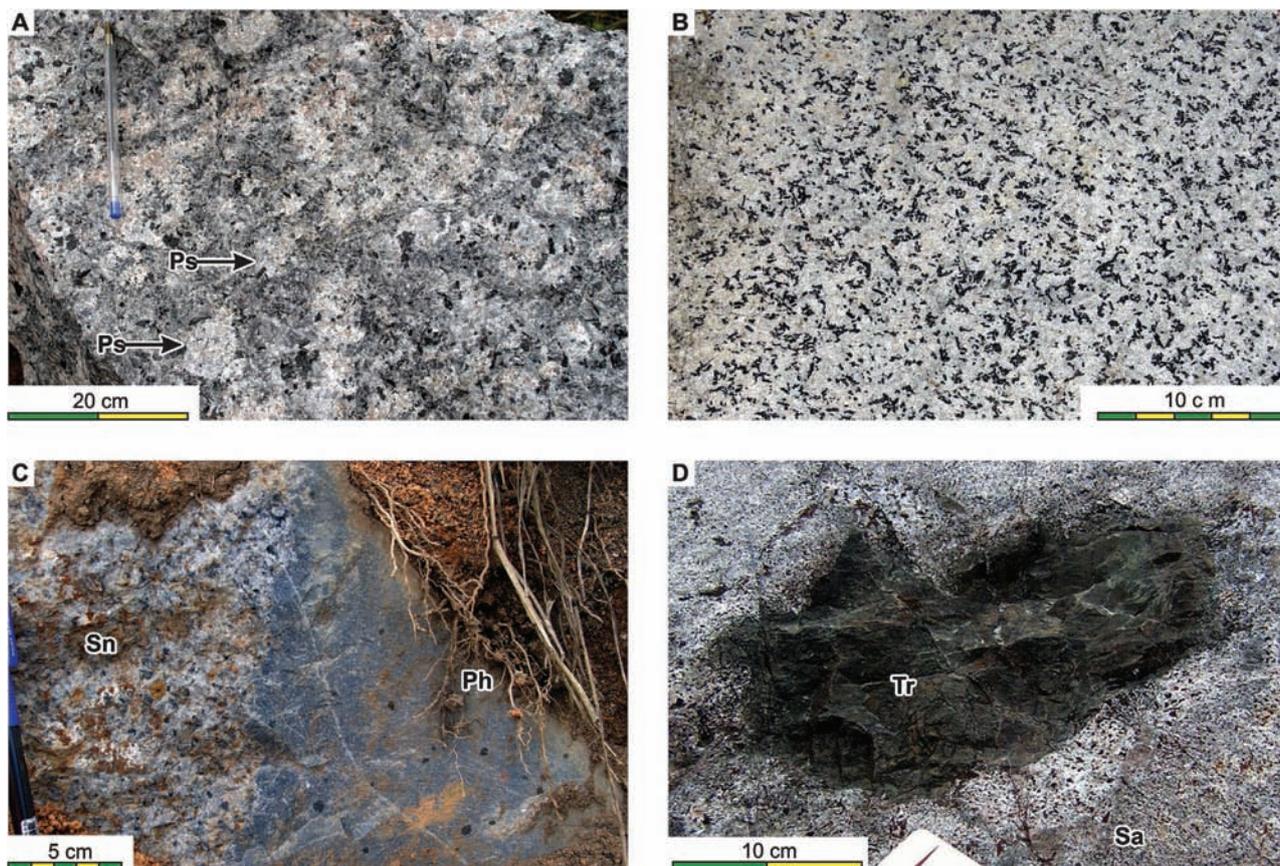


Figura 2 Rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro: (A) Pseudoleucita sienito de Tanguá, 22°41.61'S, 42°45.91'W. O mineral máfico é biotita; (B) Nefelina sienito do Marapicu, limitrofe ocidental do maciço Mendanha, 22°50.85'S, 43°35.78'W. O mineral máfico é anfibólio; (C) Nefelina sienito com xenólito de fonolito, Tanguá, 22°41.67'S, 42°46.60'W; (D) Álcali sienito com xenólito de traquito, Mendanha, 22°46.12'S, 43°28.12'W. Ps - pseudoleucita; Sn - nefelina sienito; Sa - álcali sienito; Ph - fonolito; Tr - traquito.

2004). Os gnaisses são intrudidos por Granito Andorinha (Penha & Wiedemann, 1984) e outro corpo graníticos pós-tectônicos. Por outro lado, na área em torno de Cabo Frio, ocorrem ortognaisses félsico e máfico (Schmitt *et al.*, 2004) com direção geral de N15°W. Devido a diferença estrutural, o terreno é chamado de Bloco Cabo Frio. Todos os gnaisses acima citados são cortados por brecha tectônica silicificada (Motoki *et al.*, 2011; 2012a) e, esses todos por diques máficos do Eocretáceo (Motoki *et al.*, 2009). Os complexos de rochas alcalinas félsicas são intrusivos no embasamento metamórfico e nos corpos intrusivos acima citados.

4 Intrusão de Rochas Alcalinas Félsicas

No Estado do Rio de Janeiro, ocorrem doze corpos constituídos por rochas alcalinas félsicas do Cretáceo ao Eoceno (Figura 3). De oeste para leste, estes são: Itatiaia (Ribeiro Filho, 1964, Brotzu *et al.*, 1997); Morro Redondo (Brotzu *et al.*,

1989); Serra dos Tomazes (Ferrari *et al.*, 1977); Tinguá (Derby, 1897); Mendanha (Motoki *et al.*, 2007a); Itaúna (Motoki *et al.*, 2008a); Tanguá; Rio Bonito; Soarinho (Motoki *et al.*, 2010); Morro dos Gatos (Motoki *et al.*, 2012b); Morro de São João (Brotzu *et al.*, 2007); Ilha de Cabo Frio (Motoki & Sichel, 2008). Devido à alta resistência mecânica (Petrakis *et al.*, 2010; Aires *et al.*, 2012), esses formam saliências morfológicas, chamadas de “maciços alcalinos”.

Os corpos intrusivos alcalinos formam stocks de alguns quilômetros de extensão. A forma de intrusão é *magmatic stopping*, isto é, com desmoronamento do teto da câmara magmática (Furlong & Myers, 1985, Yoshinobu *et al.*, 2003, Žák *et al.*, 2006), representado por megaxenólitos (Figura 4). São constituídos principalmente por nefelina sienito (campo 11 de Streckeisen, 1973). Os corpos Mendanha, Tanguá, Rio Bonito e Ilha de Cabo Frio são constituídos por nefelina sienito no centro e por álcali sienito (campo 6) na zona

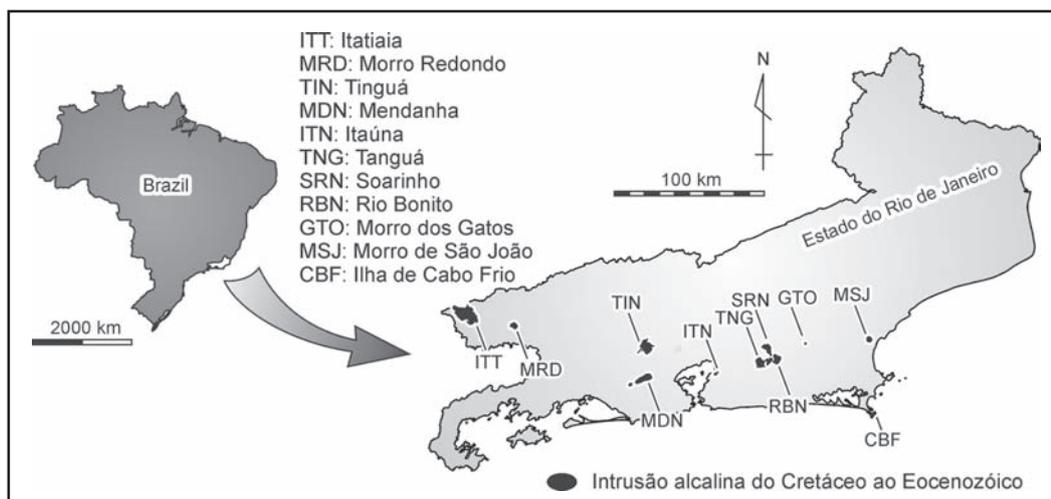


Figura 3 Corpos intrusivos de rochas alcalinas félsicas do Cretáceo ao Eoceno do Estado do Rio de Janeiro, modificado de Motoki *et al.* (2012b).

de contato. Nos complexos de Itatiaia e Soarinho, ocorrem álcali sienito e quartzo sienito. O complexo do Morro dos Gatos é composto de sienito (campo 7) a monzonito (campo 8). O complexo intrusivo da Ilha de Cabo Frio apresenta a idade Rb-Sr de 51.1 ± 7.9 Ma com a razão inicial de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0.7049 ± 0.0006 . O complexo Tanguá mostra a idade Rb-Sr de 66.8 Ma com a razão inicial de Sr de 0.7062 (Sichel *et al.*, 2011). O número limitado das análises de Tanguá não permite a estimativa dos erros da idade e da razão inicial com base no Isoplot (Motoki *et al.*, 2010).

No Complexo Intrusivo de Morro de São João, há ocorrências locais de pseudoleucita com diâmetro variando de 1 a 4 cm (Brotzu *et al.*, 2007). Nos complexos de Itaúna e Tanguá, ocorre pseudoleucita com diâmetro variando de 5 a 10 cm (Figura 2;

Valença & Edgar, 1979). O complexo de Itaúna é formado de micro-nefelina sienito na parte central e fonolito na borda. Certos corpos contêm xenólitos de fonolito ou traquito (Figura 2C, D), indicando que havia intrusão precursora antes do corpo principal de rochas plutônicas. Esses fonolito e traquito, formadores de corpos intrusivos, são caracterizados por textura holocristalina com a granulometria correspondente às rochas hipabissais. Devido a ser mais antigo do que a intrusão principal de nefelina sienito e álcali sienito, estes são chamados de fonolito e traquito da primeira geração (Motoki *et al.*, 2007b). No complexo do Mendanha, o traquito da primeira geração constitui um corpo intrusivo de centenas metros de espessura e quilômetros de extensão horizontal (Figura 4).

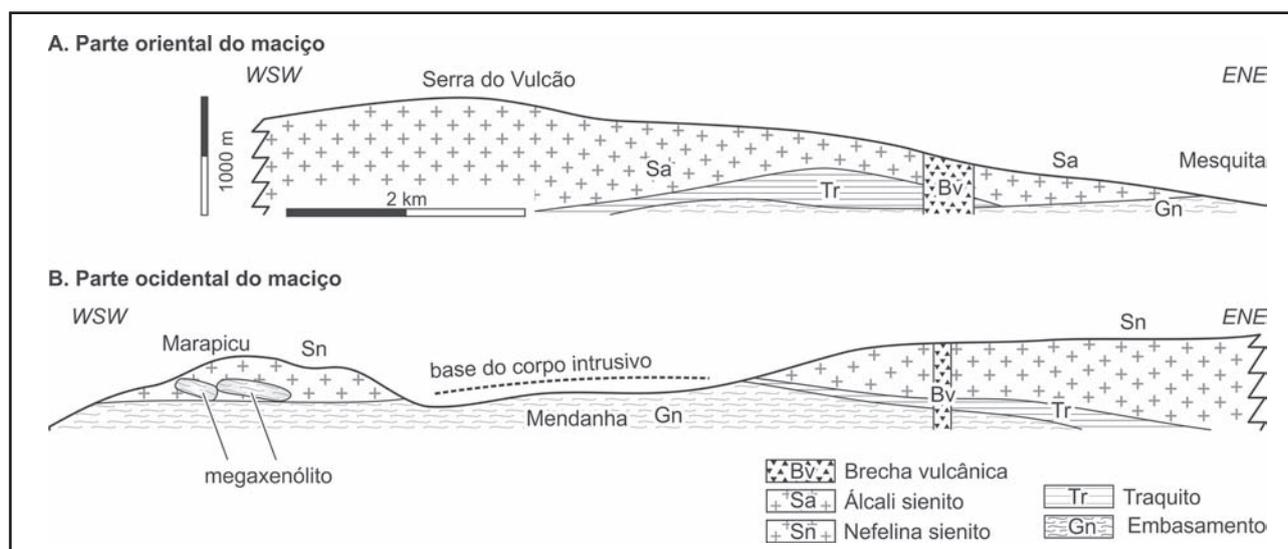


Figura 4 Perfil geológico do Complexo Intrusivo do Mendanha, RJ, demonstrando os aspectos geológicos da base de uma câmara magmática (modificado de Motoki *et al.*, 2008b).

Ocorrem, também, frequentemente diques de fonolito e de traquito com largura em torno de 1 m que cortam nefelina sienito e álcali sienito. As rochas constituintes são caracterizadas por textura devitrificada, sugerindo resfriamento muito rápido. São chamados de fonolito e traquito da segunda geração (Motoki *et al.*, 2007b). O Complexo Intrusivo da Ilha de Cabo Frio é mais complexo, havendo três gerações de diques (Motoki *et al.*, 2008c): 1) Lamprófito, de ocorrência anterior aos corpos de brecha subvulcânica e nefelina sienito; 2) Traquito hidrotermalizado, contemporâneo ao nefelina sienito; 3) Fonolito, de ocorrência posterior ao nefelina sienito.

Os complexos intrusivos de Mendanha (Motoki *et al.*, 2007c), Itaúna (Motoki *et al.*, 2008a), Tanguá (Motoki *et al.*, 2010), Morro dos Gatos

(Motoki *et al.*, 2012b) e Ilha de Cabo Frio (Sichel *et al.*, 2008) acompanham rochas piroclásticas de preenchimento de condutos e fissuras subvulcânicas. Estas têm aspectos litológicos similares daquelas formadoras de fluxo piroclástico (Motoki & Sichel, 2006), porém até o presente na região interessada não foram confirmadas geologicamente as rochas piroclásticas formadoras de corpos extrusivos, tais como depósitos eruptivos ou edifício vulcânico (Motoki *et al.*, 2008d). Essas são constituintes de necks subvulcânicos e diques piroclásticos que foram posicionadas em torno de 3 km abaixo da superfície (Figura 5; Motoki *et al.*, 2007c), sendo similar ao caso do neck subvulcânico do Pico do Cabugi, RN (Motoki *et al.*, 2012c). Os corpos de nefelina e sienito e álcali sienito correspondem à base de câmaras magmáticas subvulcânicas daquele tempo (Figura 3).

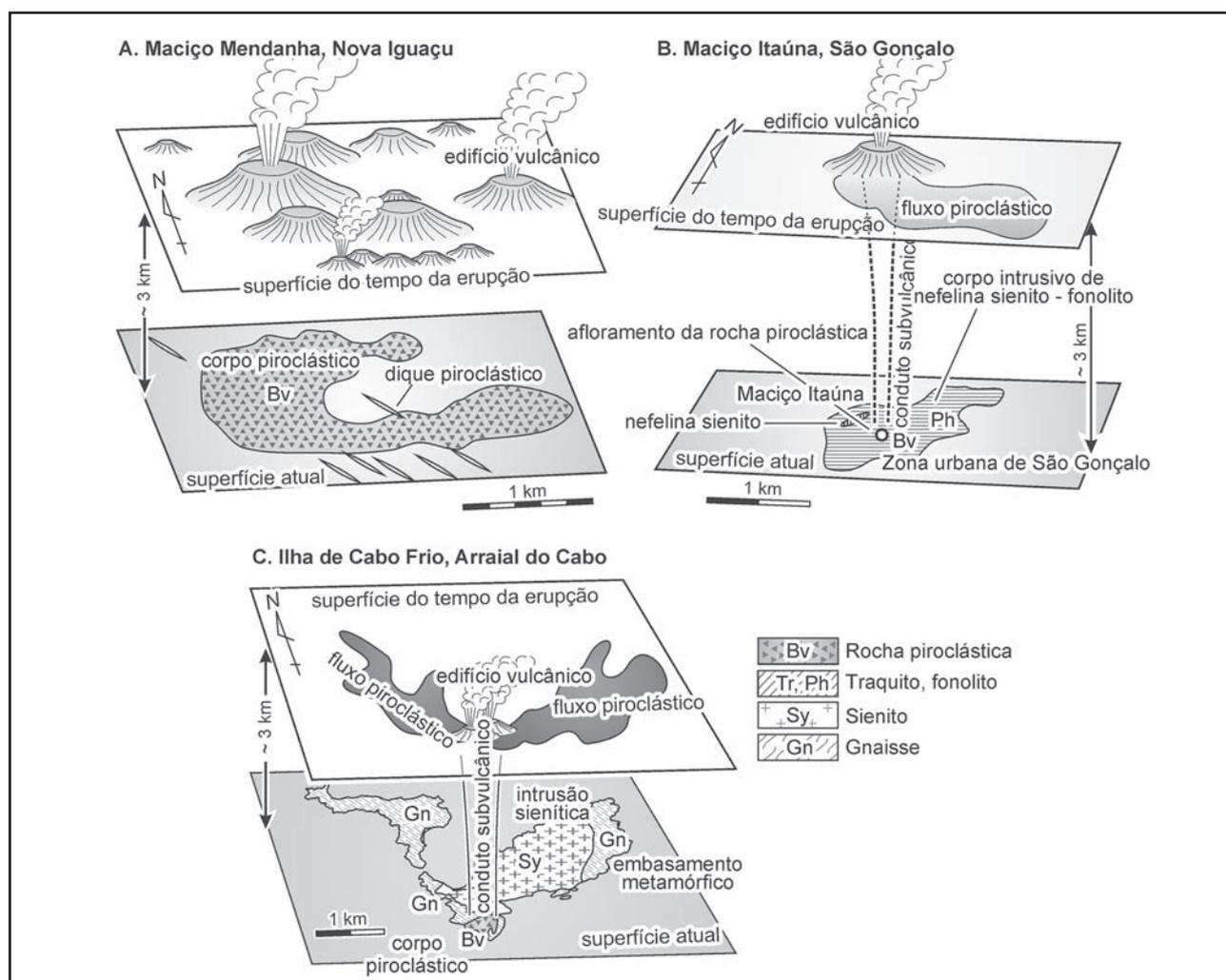


Figura 5 Forma de ocorrência geológica dos complexos intrusivos de rochas alcalinas félsicas do Estado do Rio de Janeiro e piroclásticas associadas como condutos subvulcânicos de 3 km de profundidade (Motoki *et al.*, 2008b).

5 Características Petrográficas

O nefelina sienito é constituído principalmente por álcali feldspato com abundância modal aproximada de 80% (Figura 6A). Observa-se a pertita do tipo *interlocking perthite*, que é característica de feldspato alcalino intermediário correspondente a anortoclásio. Feldspato potássico é raro e plagioclásio está ausente. Nas pedreiras do Pico do Marapicu, em região no limítrofe oeste do maciço Mendanha, 22°50,85S, 43°35,78'W, ocorre um típico exemplo.

O micro-nefelina sienito do Complexo de Itaúna é caracterizado por uma distribuição intersticial de feldspato alcalino. A nefelina ocorre nos espaços triangulares intersticiais (Figura 6B), com quantidade modal pouco maior do que 10%. Este mineral geralmente apresenta alteração parcial em analcima, cancrinita e natrolita. Os minerais máficos são anfibólio e biotita, com eventual ocorrência de clinopiroxênio. O anfibólio tem hábito prismático curto, sugerindo o pseudomorfo segundo clinopiroxênio. O clinopiroxênio do nefelina sienito da Ilha de Cabo Frio tem a borda de reação composta de anfibólio. A pseudoleucita nefelina sienito do Complexo de Tanguá possui

biotita como o único mineral máfico presente na massa fundamental (Figura 2A).

Os minerais acessórios principais são titanita e apatita. Não se encontram zircão e monazita. O álcali sienito ocorre na região limítrofe leste do Maciço Mendanha e na borda dos complexos intrusivos de Tanguá e da Ilha de Cabo Frio. O feldspato alcalino tem abundancia modal de 90% e, a textura de *interlocking perthite* é notável. Os minerais máficos são anfibólio e biotita. A granulometria é, em geral, pouco menor do que aquele do nefelina sienito (Figura 6C). O mineral acessório principal é titanita com a ocorrência de apatita.

O fonolito e o traquito da primeira geração, que ocorrem como corpos intrusivos pequenos, são caracterizados por textura holocristalina de granulometria relativamente grossa, sugerindo o resfriamento magmático não muito rápido. Os fenocristais são constituídos por feldspato alcalino de tamanho milimétrico (Figura 6D). A massa fundamental tem textura intersticial ou traquítica com micrólitos de feldspato alcalino de tamanho de 0,5 mm ou maior.

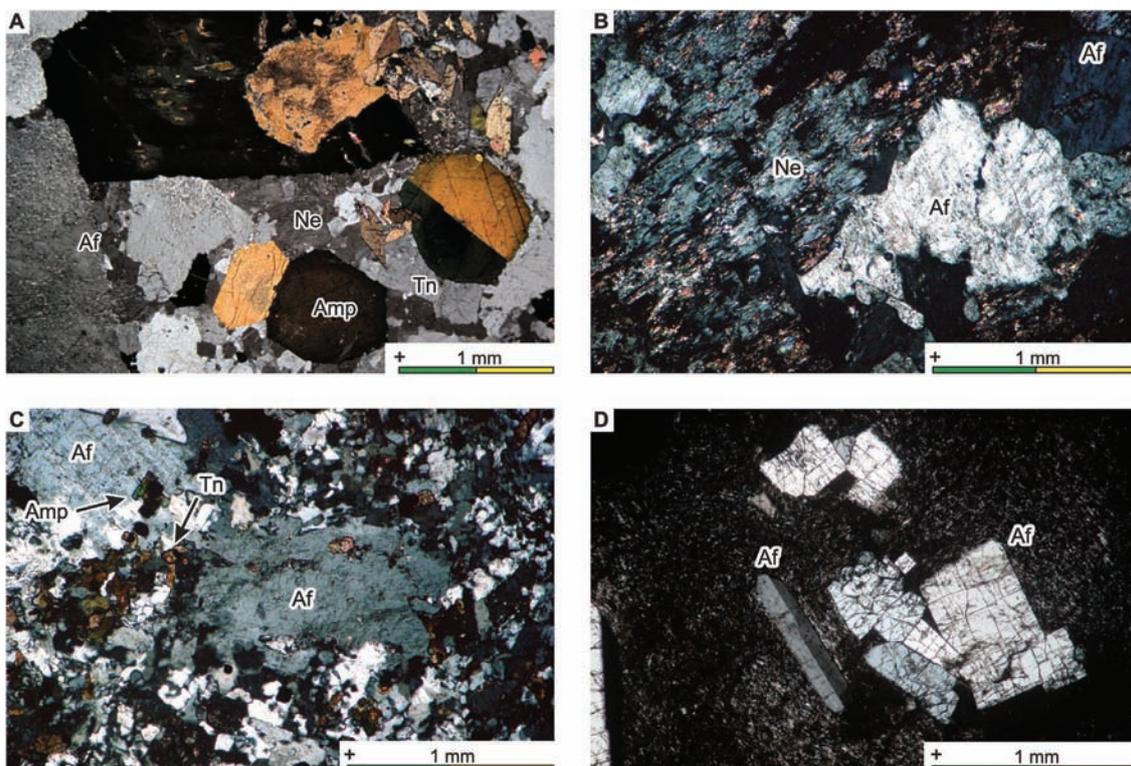


Figura 6 Fotomicrografia das rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro: (A) Nefelina sienito do Marapicu, 22°50,85'S, 43°35,78'W; (B) Nefelina sienito de Tanguá, Tanguá, 22°41,67'S, 42°46,60'W; (C) Álcali sienito de Tanguá, 22°40,93'S, 42°46,12'W; (D) Fonolito de Tanguá, 22°41,67'S, 42°46,60'W. Af - feldspato alcalino; Ne - nefelina; Amp - anfibólio; Tn - titanita.

O fonolito e o traquito da segunda geração, que ocorrem como diques, têm a massa fundamental devitrificada ou somente de granulometria fina (Figura 6B), o que indica o resfriamento rápido. No centro dos diques de largura maior do que 1 m, observa-se a textura intersticial, porém a borda apresenta a textura traquítica. Os fenocristais são compostos de feldspato alcalino de forma quadrada ou tabular de tamanho variando de 1 mm até 1 cm.

6 Geoquímica dos Elementos Principais

Dados geoquímicos das rochas alcalinas na área interessada são abundantes. O grupo de pesquisa dos autores apresentou análises das amostras dos complexos intrusivos de Itaúna, Tanguá, Rio Bonito,

Soarinho, Morro de São João, Itatiaia, e Ilha de Cabo Frio por Valença (1980, citados por Motoki *et al.*, 2010), Motoki *et al.* (2010) e Sichel *et al.* (2011). Existem também os dados dos outros grupos para os complexos de Itatiaia, Mendanha e Morro de São João (Brotzu *et al.*, 1997, 2007, Arena *et al.*, 2006, Mota *et al.*, 2009).

A Figura 7 apresenta a classificação geoquímica das rochas alcalinas no diagrama de SiO₂ vs. Na₂O+K₂O (Le Bas *et al.*, 1986) com base no acervo dos autores, acrescentando 15 novas análises do complexo de Tanguá (Tabela 1). O diagrama demonstra duas séries diferentes de evolução geoquímica dos magmas alcalinos: 1) Para as rochas alcalinas máficas e intermediárias; 2) Para as rochas alcalinas félsicas.

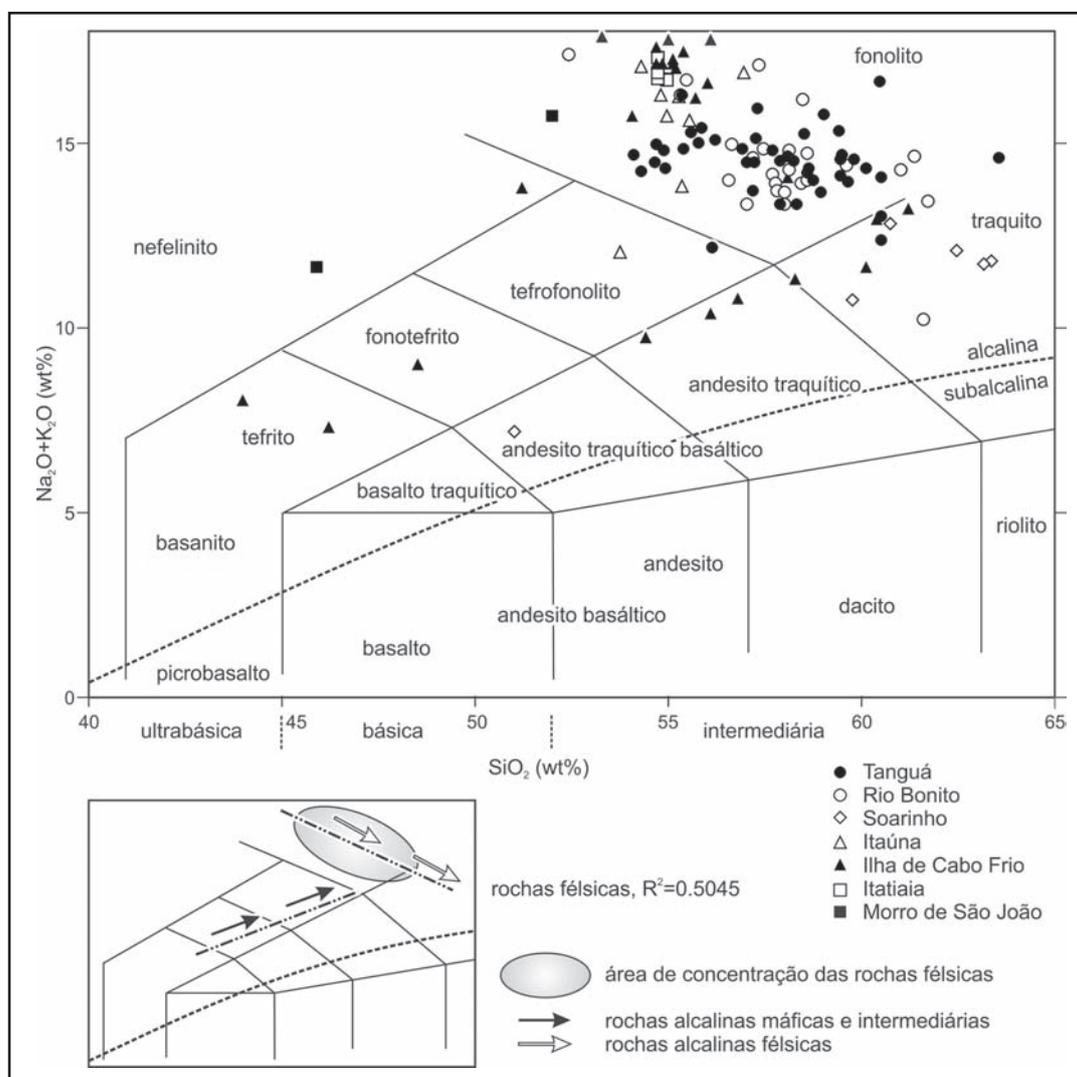


Figura 7 Classificação das rochas ígneas do Estado do Rio de Janeiro conforme a nomenclatura geoquímica de Na₂O+K₂O vs. SiO₂ em porcentagem de peso (Le Bas *et al.*, 1986). Os dados são originados de Valença (1980), Motoki *et al.* (2010), Sichel *et al.* (2011) e as análises novas para o presente trabalho, em total, 119 análises.

As rochas máficas são constituídas por 3 amostras da Ilha de Cabo Frio e uma de Soarinho e uma do Morro de São João. As intermediárias são 4 da Ilha de Cabo Frio, uma de Itaúna e uma de Tanguá, Soarinho e Morro de São João. O teor de SiO_2 varia de 44,00 a 56,80%, que corresponde a rochas ultrabásicas, básicas e intermediárias. As rochas alcalinas máficas ocorrem como diques, sendo chamadas de lamprófiro (Figura 8). A amostra do Morro de São João é altamente máfica e alcalina, sendo classificada como nefelinito, e ocorre como xenólito capturado no nefelina sienito. Na Figura 7, essas formam uma seqüência subparalela ao limite entre rochas alcalinas e subalcalinas (setas pretas), sugerindo cristalização fracionada de minerais máficos, tais como clinopiroxênio e anfibólio.

As rochas félsicas se projetam principalmente no campo de fonólito e parcialmente no campo de traquito, sendo classificados respectivamente como nefelina sienito e álcali sienito. O teor de SiO_2 varia de 52,43 a 63,57%, que corresponde a faixa de rochas intermediárias, e não, ácidas. Essas formam uma seqüência de uma razoável convergência linear, $R^2=0,5045$, apresentando elevação da sílica por redução dos álcalis, que é oblíqua ao limite entre rochas alcalinas e subalcalinas (setas brancas). Desta forma, a variação geoquímica não é devida à cristalização fracionada. Uma idéia alternativa é assimilação da crosta continental.

A Figura 9 mostra a classificação das rochas alcalinas no diagrama de Na_2O vs. K_2O (Middlemost, 1975). A maioria das rochas é classificada como da série potássica e ultrapotássica. As rochas da série ultrapotássica são pertencentes aos complexos intrusivos de Tanguá e Morro de São João, onde

ocorre pseudoleucita sienito. A metade das amostras do complexo do Rio Bonito é ultrapotássica e, a outra metade, potássica.

Este diagrama também mostra duas seqüências: 1) Para as rochas máficas e intermediárias (setas pretas); 2) Para as rochas félsicas (setas brancas). As rochas máficas e intermediárias apresentam elevação conjunta de Na_2O e K_2O , sendo de tendência normal de cristalização fracionada. Porém, as rochas félsicas mostram a tendência oposta, com a elevação de Na_2O ocorre a redução de K_2O , que é observada especificamente em rochas alcalinas félsicas (Motoki *et al.*, 2010, Sichel *et al.*, 2011).

No diagrama de saturação de álcali alumina (Maniar & Piccoli, 1989), as rochas félsicas formam uma seqüência linear passando pelos campos de rochas peralcalinas, metalcalinas metaluminosas e peraluminosas (Figura 10). As rochas máficas estão espalhadas nos campos metalcalino metaluminoso e peraluminoso.

O diagrama classificatório de ambientes tectônicos por R_1 vs. R_2 (Batchelor & Bowden, 1985) apresenta que quase todas as amostras são projetadas fora das áreas de classificações geotectônicas (Figura 11), sendo que, o referido diagrama não é adequado para rochas alcalinas félsicas.

O diagrama de Harker (Harker, 1909) é o diagrama de variação composicional mais utilizado. Esse adota SiO_2 como a abscissa e é útil para os estudos de cristalização fracionada para rochas ígneas da série Ca-alcaina. Entretanto, o diagrama não é tão eficiente para rochas alcalinas félsicas, sendo que, muitos componentes não apresentam boa convergência com o teor de SiO_2 . Como por

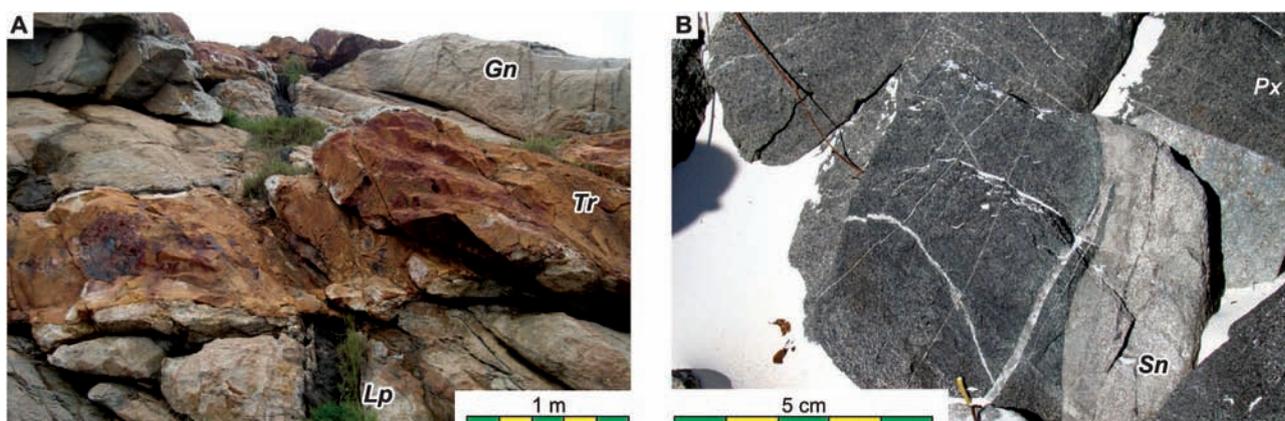


Figura 8 Rochas alcalinas máficas: (A) Dique de lamprófiro intrusivo no embasamento, cortado por soleira de traquito autometamórfico, Arraial do Cabo, RJ; (B) Xenólito máfico no nefelina sienito da Ilha de Cabo Frio. Tr - traquito autometamórfico; Lp - dique de lamprófiro; Px - xenólito máfico; Sn - nefelina sienito.

Cristalização Fracionada e Assimilação da Crosta Continental pelos Magmas de Rochas Alcalinas Félsicas do Estado do Rio de Janeiro
Susanna Eleonora Sichel; Akihisa Motoki; Woldemar Iwanuch; Thais Vargas; José Ribeiro Aires; Dean Pereira de Melo; Kenji Freire Motoki; Alex Balmant & Juliana Gonçalves Rodrigues

Nefelina sienito							
% peso	TNG 31	TNG 32	TNG 36A	TNG 37	TNG 38	TNG 39A	TNG 39B
SiO ₂	59,5	58,5	56,9	57,3	54,3	57,7	54,9
TiO ₂	1,08	0,79	1,24	1,13	1,41	1,20	1,35
Al ₂ O ₃	18,80	19,70	19,70	19,50	20,10	19,60	19,90
FeO*	4,16	4,01	4,32	4,13	5,10	3,83	4,97
MnO	0,21	0,18	0,18	0,18	0,18	0,14	0,19
MgO	0,59	0,40	0,63	0,63	0,90	0,59	0,79
CaO	2,04	2,06	3,00	1,80	3,54	2,43	3,45
Na ₂ O	5,40	5,60	4,52	5,24	5,12	4,35	5,57
K ₂ O	8,45	8,79	9,48	9,80	8,32	9,64	8,41
P ₂ O ₅	0,128	0,09	0,163	0,162	0,28	0,151	0,255
Total	100,4	100,1	100,1	99,9	99,3	99,6	99,8
ppm							
Cr	n.d.	29	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6
Ni	n.d.	14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
V	24	24	30	25	44	22	40
Rb	124	98	42	173	n.d.	93	64
Sr	8	159	269	50	607	251	825
Ba	0	10	38	8	51	17	33
Zr	104	107	106	116	92	98	146
Y	84,79	36,82	51,35	52,25	38,38	49,11	45,78
Nb	163	97	95	80	n.d.	139	167
Th	13	10,7	10,7	9,7	9,6	11,6	17
U	2,56	2,01	2,23	1,81	1,78	2,45	3,48
Cu	n.d.						
Pb	n.d.						
Zn	72	54	52	58	35	39	41
Sn	0	0	0	0	0	0	0
S	n.a.						
Mg#	0,20	0,15	0,21	0,21	0,24	0,22	0,22
D.I.	89,3	89,99	88,04	88,73	85,34	89,77	85,02
K/NaK	0,61	0,61	0,68	0,65	0,62	0,69	0,60
NK/A	0,96	0,95	0,90	0,99	0,87	0,90	0,92
SSI	-150	-204	-204	-248	-257	-170	-282
% peso	TNG 41	TNG 42	TNG 43	TNG 44	TNG 45	TNG 46	TNG 47
SiO ₂	54,7	54,1	59,8	57,2	55,4	56,2	55,8
TiO ₂	1,34	1,42	0,68	1,57	1,01	0,93	1,00
Al ₂ O ₃	19,90	19,80	18,80	18,50	20,40	20,40	20,20
FeO*	2,01	1,94	1,54	1,65	1,49	1,31	1,49
MnO	3,36	3,24	2,57	2,75	2,48	2,18	2,48
MgO	0,19	0,19	0,23	0,15	0,15	0,13	0,13
CaO	0,81	0,78	0,32	0,85	0,62	0,51	0,59
Na ₂ O	3,28	3,69	2,21	3,02	2,68	2,44	2,63
K ₂ O	5,74	5,07	5,45	3,66	5,35	6,05	5,62
P ₂ O ₅	8,39	8,79	8,28	9,30	8,68	8,21	8,54
Total	99,72	99,02	99,88	98,65	98,26	98,36	98,48
ppm							
Cr	n.d.	n.d.	n.d.	25	n.d.	16	n.d.
Ni	n.d.	n.d.	n.d.	11	n.d.	6	n.d.
V	42	45	10	26	26	25	26
Rb	51	124	143	74	62	0	90
Sr	695	1213	25	338	1738	1740	1361
Ba	54	63	6	15	79	81	68
Zr	213	169	112	105	122	115	210
Y	44,40	44,82	81,86	61,70	33,21	32,29	32,50
Nb	175	170	177	209	174	164	113
Th	17,5	14,2	14,6	12	15,9	13,8	14,3
U	3,4	3,16	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	n.d.						
Pb	n.d.						
Zn	42	54	78	33	46	38	45
Sn	6	24	n.d.	12	n.d.	n.d.	n.d.
S	n.a.						
Mg#	0,22	0,22	0,13	0,26	0,22	0,21	0,22
D.I.	84,72	84,2	89,32	86,77	88,14	88,75	87,87
K/NaK	0,59	0,63	0,60	0,72	0,62	0,58	0,60
NK/A	0,93	0,90	0,95	0,87	0,89	0,92	0,92
SSI	-296	-278	-135	-113	-252	-261	-255

Tabela 1 Análises novas de elementos principais e traços para rochas alcalinas félsicas do Complexo Intrusivo de Tanguá, RJ. O índice de diferenciação magmática (D.I.) corresponde ao soma dos minerais félsicos da Norma CIPW (Thornton & Tuttle, 1960). O índice de saturação de sílica (SSI) é calculado conforme a fórmula de (9785+K₂O/94,1956)-CaO/56,077-MgO/40,304-MnO/70,937-FeO/71,844+2Fe₂O₃/159,687).

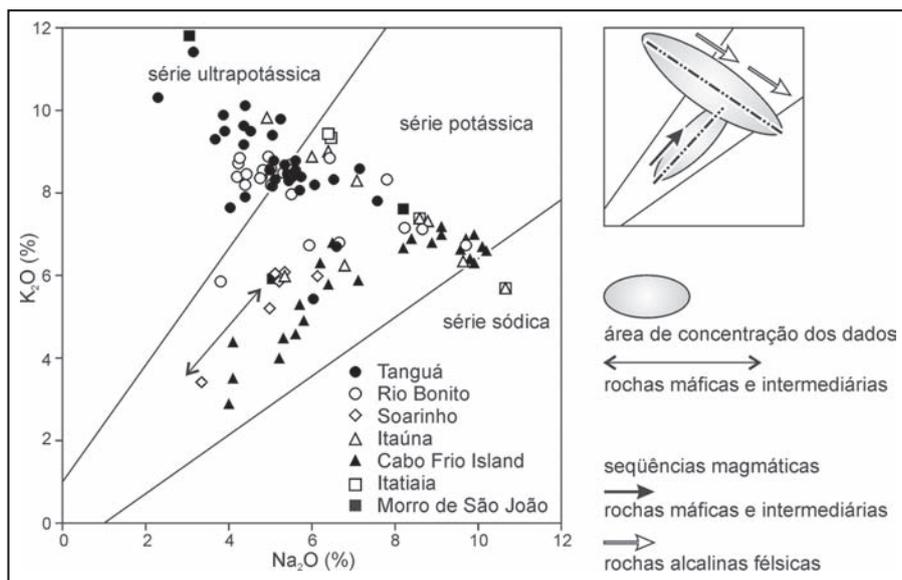


Figura 9 Diagrama de Na_2O vs. K_2O em porcentagem de peso (Middlemost, 1975) para as rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro. Os dados são das mesmas fontes da Figura 7.

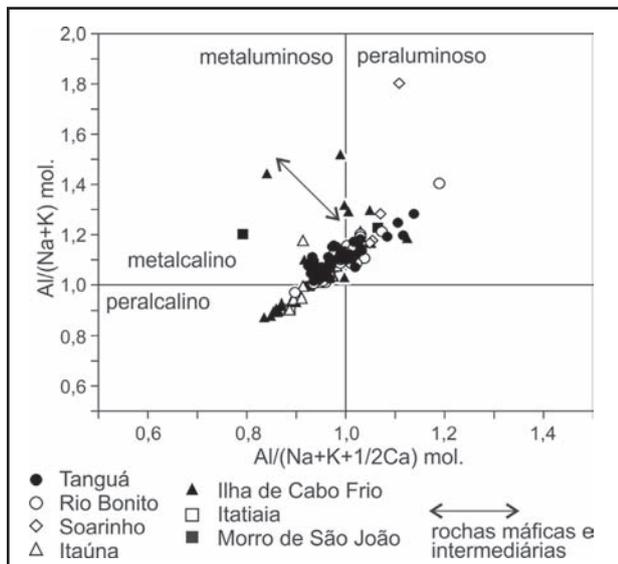


Figure 10 Diagrama de saturação de álcali alumina (Maniar & Piccoli, 1989) para as rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro. As proporções $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}+1/2\text{Ca})$ e $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ são moleculares. Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

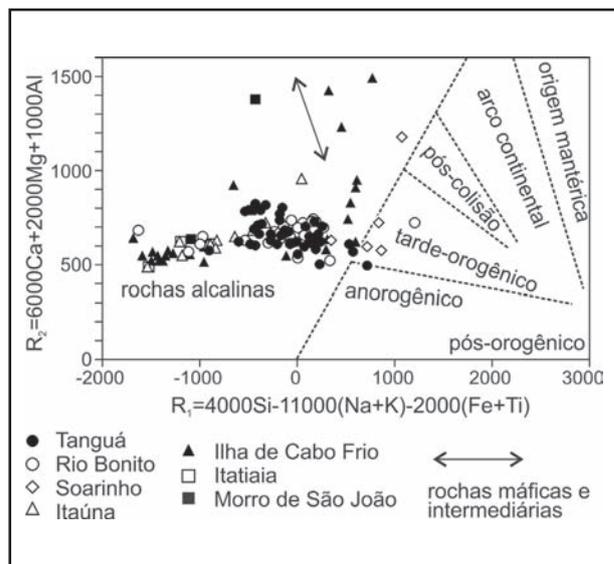


Figura 11 Projeção das rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro no diagrama classificatório de ambientes tectônicos por R_1 vs. R_2 (Batchelor & Bowden, 1985). Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

exemplo, os índices de correlação R^2 para MgO e Mg\# são baixos, sendo respectivamente, 0,2659 e 0,0513. O fato indica que a principal causa da variação química não é cristalização fracionada. De fato, as rochas máficas e intermediárias formam seqüências lineares de convergência relativamente boa, porém as rochas félsicas estão espalhadas nos diagramas de Harker. Excepcionalmente, CaO mostra boa correlação negativa (Figura 12A) com o R^2 de 0,3438. Redução de CaO e elevação de SiO_2 ocorrem tanto por cristalização fracionada de

clinopiroxênio e anfibólio quanto por assimilação da crosta continental.

Por outro lado, alguns diagramas de variação apresentam boas convergências. Os diagramas FeO^* vs. MgO e CaO vs. MgO (Figura 12B, C) mostram correlações positivas com os R^2 respectivos de 0,7396 e 0,8423. Junto com o diagrama de SiO_2 vs. CaO , estes indicam cristalização fracionada de clinopiroxênio e anfibólio. O diagrama FeO^* vs. TiO_2 mostra a correlação positiva com o R^2 de 0,6754

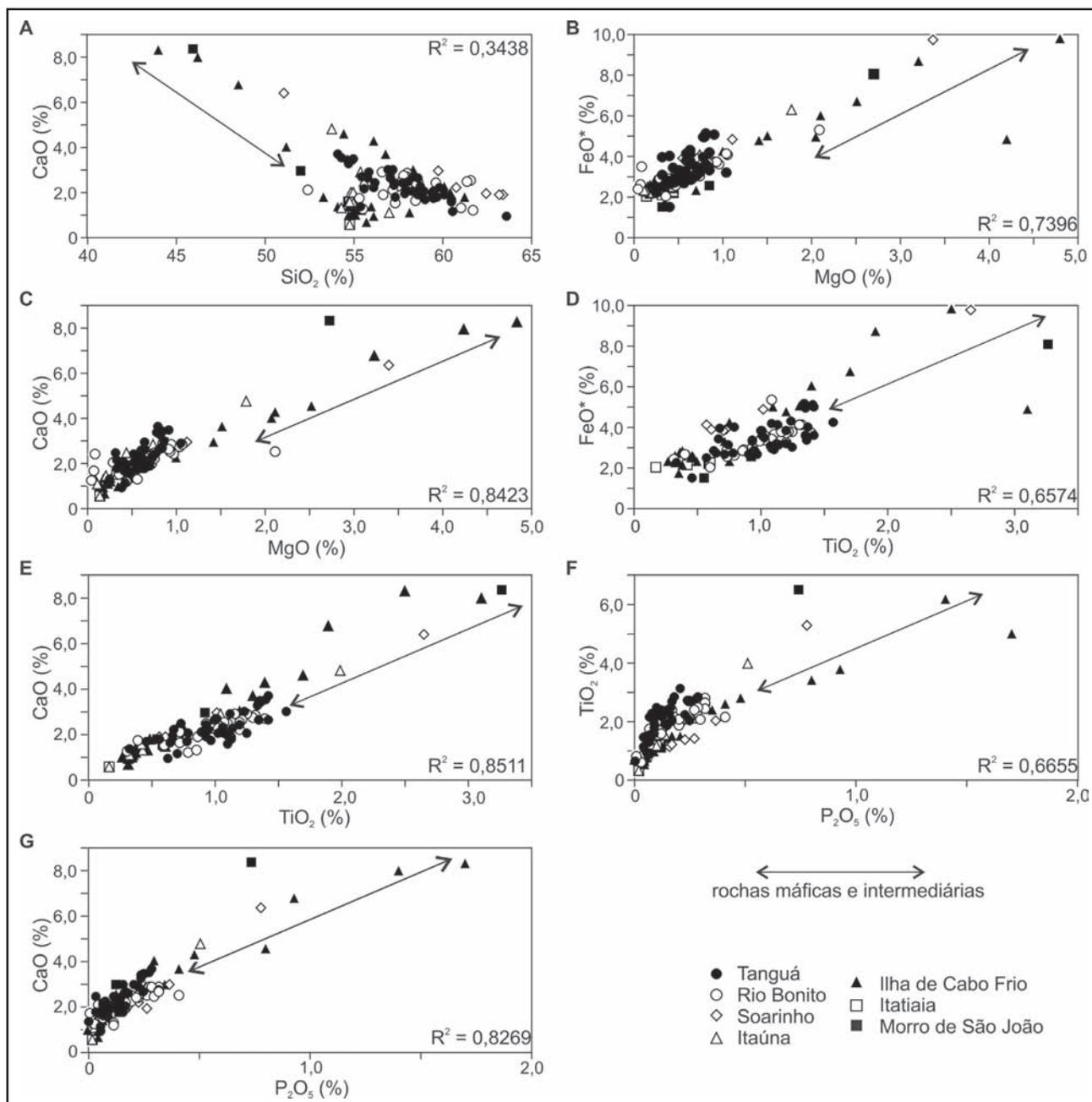


Figura 12 Diagrama de correlação com alto índice de correlação que indicam cristalização de clinopiroxênio, anfibólio, ilmenita, titanita e apatita. Os componentes são expressos em porcentagem de peso. Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

(Figura 12D), sugerindo cristalização de ilmenita. Os diagramas CaO vs. TiO_2 e P_2O_5 vs. TiO_2 têm altos R^2 , sendo respectivamente 0,8511 e 0,6655 (Figura 12E, F), o que indica cristalização de titanita. O diagrama CaO vs. P_2O_5 , com o R^2 de 0,8269 (Figura 12G), sugere cristalização de apatita. Os altos índices de correlação indicam que a cristalização fracionada de clinopiroxênio, anfibólio, ilmenita, titanita e apatita é comum tanto para as rochas alcalinas máficas,

intermediárias e félsicas. Os minerais acima citados foram observados em lâminas delgadas (Figura 6).

7 Duas Séries de Cristalização Fracionada

Valença (1980) interpretou, com base nas observações de campo e análises geoquímicas, que os magmas de nefelina sienito do Estado do Rio de

Janeiro foram originalmente potássicos e evoluíram para serem sódicos através de cristalização de leucita. Ulbrich (1984) apresentou uma idéia similar para o Complexo Alcalino Intrusivo de Poços de Caldas. Ele apontou que o magma se evoluiu de miaskítico para agpaítico através da cristalização fracionada. Motoki *et al.* (2010) e Sichel *et al.* (2011) confirmaram as idéias do fracionamento magmático de potássico para sódico e apresentaram o modelo de evolução geoquímico em três estágios: 1) O magma ultrapotássico se evoluiu para potássico através da cristalização de leucita até que chegar à curva cotéctica; 2) O magma cristalizou feldspato alcalino com a proporção $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ em peso aproximadamente de 0,7, e se evoluiu ao longo da curva cotéctica de potássico para sódico ao o ponto de temperatura mínima; 3) Durante a evolução na curva cotéctica, ocorreu a assimilação da crosta continental.

Com base nesta idéia, a proporção $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ em peso pode funcionar como um índice de cristalização fracionada para os magmas de rochas alcalinas félsicas. Conforme o avanço da cristalização fracionada, este parâmetro para os magmas alcalinos félsicos abaixa, sendo a tendência oposta de rochas máficas e intermediárias.

A Figura 13 demonstra os diagramas de variação com abscissa de $K_2O/(K_2O+Na_2O)$. As coordenadas são os elementos ou parâmetro de possível indicador de grau de cristalização fracionada. Os diagramas mostram existência de duas séries nitidamente diferentes, para as rochas félsicas e as rochas máficas e intermediárias. As rochas máficas e intermediárias apresentam a elevação de $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ através de redução de MgO e CaO (Figura 13A, B, setas pretas). Por outro lado, as rochas félsicas mostram abaixamento da $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ por meio de redução de MgO, CaO e TiO_2 (Figura 13A, B, C, setas brancas) com boas convergências lineares. Os R_2 são, respectivamente, 0,2356, 0,3894 e 0,5419.

A proporção $Al(Na+K)_{mol}$ das rochas félsicas diminui através de redução da $K_2O/(K_2O+Na_2O)$, com o R_2 de 0,4674 (Figura 13D, setas brancas), isto é, o magma torna-se mais peralcalinos por avanço de cristalização fracionada, confirmando a idéia de Ulbrich (1984). O mesmo fenômeno é observado qualitativamente nas rochas máficas e as intermediárias (Figura 13D, setas pretas).

A seqüência de evolução magmática para as rochas máficas e intermediárias e aquela para as

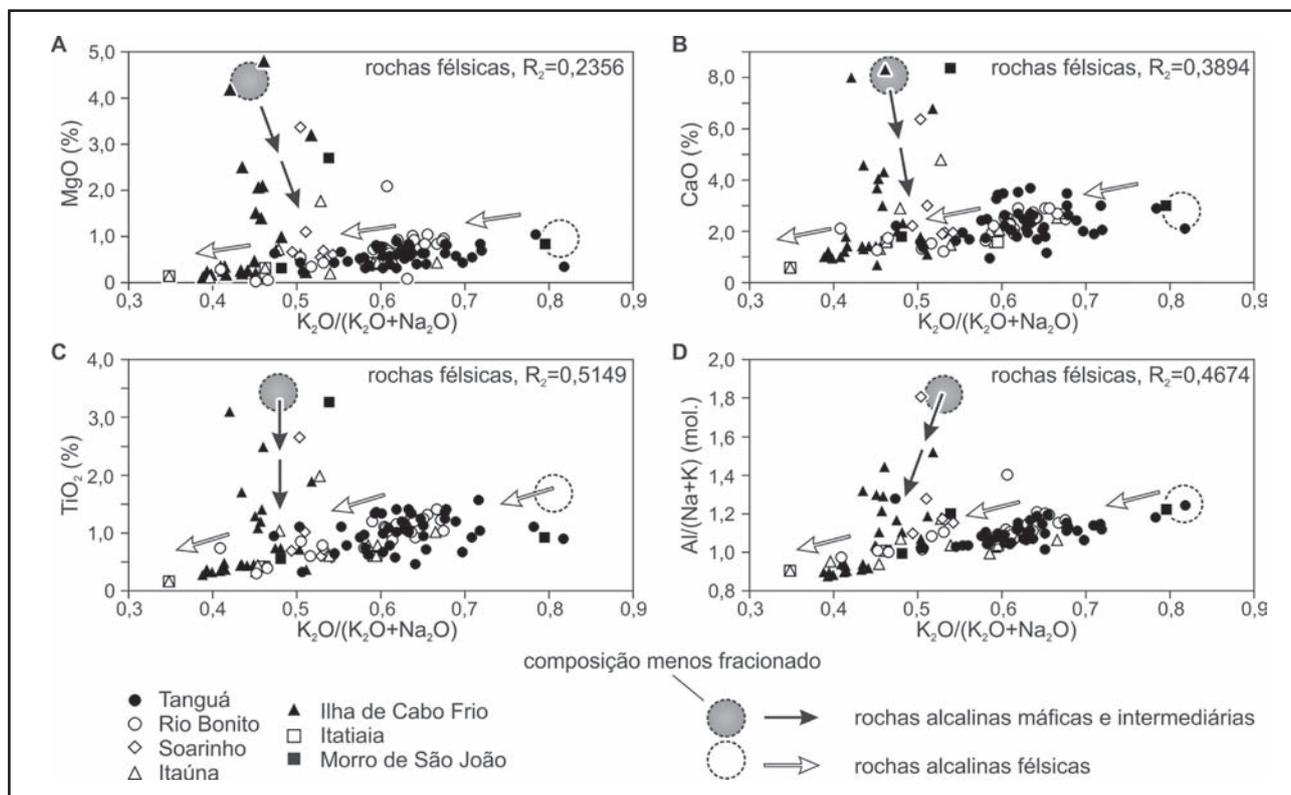


Figura 13 Diagramas de variação com abscissa de $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ em porcentagem de peso. MgO, CaO e TiO_2 são expressos em porcentagem de peso e $Al/(Na+K)$ é de proporção molecular. Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

rochas félsicas são descontínuas. As composições dos magmas menos fracionados também são diferentes (Figura 13). Esta observação sugere que os magmas de nefelina sienito do Estado do Rio de Janeiro não são derivados dos magmas das rochas alcalinas máficas.

8 Assimilação da Crosta Continental

Os dados geoquímicos sugerem uma forte influência de assimilação de crosta continental pelos magmas de rochas alcalinas félsicas. Para estudar este fenômeno, Motoki *et al.* (2010) propuseram o diagrama com abscissa de $(Na+K)/Al$ (mol.) e coordenada de SSI (*silica saturation index*), denominado diagrama de SSI (*SSI diagram*; Figura 14).

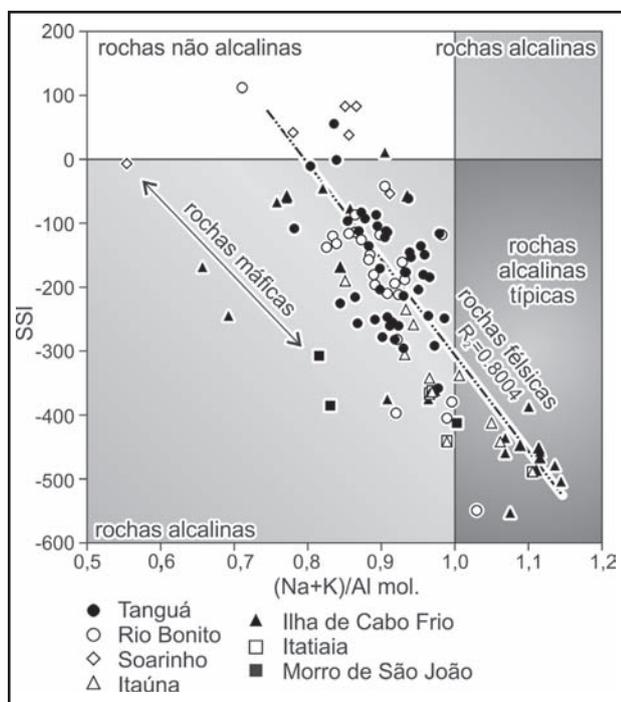


Figura 14 Diagrama de SSI (silica saturation index) para as rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro. Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

A coordenada apresenta o índice de saturação de sílica, que é calculado pela fórmula: $SSI = 1000(SiO_2/60,0835 - Al_2O_3/101,9601 - 5(Na_2O/61,9785 + K_2O/94,1956) - CaO/56,077 - MgO/40,304 - MnO/70,937 - FeO/71,844 + 2Fe_2O_3/159,687)$. Esta fórmula foi elaborada com base nos cálculos de Norma CIPW. A proporção FeO/FeO^* (mol.) foi estimada como 0,65 (Motoki *et al.*, 2010, Sichel *et al.*, 2011). As rochas ígneas com o SSI negativo são subsaturadas

em sílica, possuem nefelina normativa e pertencem à série alcalina. As rochas félsicas com o SSI positivo são supersaturadas em sílica, têm quartzo normativo e são pertencentes da série não alcalina. Existem rochas intermediárias e máficas que possuem o SSI positivo porém não têm quartzo e nefelina normativos, chamadas de rochas saturadas em sílica. Neste sentido, este diagrama é adequado para rochas ígneas félsicas, tais como nefelina sienito, álcali sienito, álcali granito e granito.

A abscissa, $(Na+K)/Al_{mol.}$, representa o grau de saturação de álcali alumina. A maioria das rochas ígneas tem este parâmetro pouco inferior a 1,0. As rochas com o parâmetro superior a 1,0 são peralcalinas, chamadas também de agraíticas, e possuem acmita normativa. Tais rochas alcalinas podem conter minerais máficos alcalinos, tais como egrina-augita, e não contêm plagioclásio. As rochas que têm $(Na+K)/Al_{mol.}$ muito abaixo de 1,0 e $(Na+K+1/2Ca)/Al_{mol.}$ inferior a 1,0 são peraluminosas, ou seja, rochas miaskíticas. Estas rochas possuem plagioclásio modal e coríndon normativo e podem ter muscovita modal. Neste sentido, o diagrama é adequado para as rochas sem plagioclásio, tais como nefelina sienito, álcali sienito e álcali granito.

Os dois quadrantes inferiores deste diagrama são campos subsaturados em sílica e, as rochas correspondentes são classificadas geoquimicamente como rochas alcalinas. Os dois quadrantes direitos são peralcalinas e as rochas são classificadas também como alcalinas. As rochas tipicamente alcalinas, tais como o egrina fonolito e nefelina sienito de Complexo Intrusivo de Poços de Caldas, MG, (e.g. Ulbrich, 1984), se projetam no quadrante direito inferior. Por outro lado, as rochas típicas da crosta superior, tais como granito, ortognaisse e paragnaisse, se projetam no quadrante esquerdo superior. Muitas rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro estão no quadrante esquerdo inferior e uma parte, direito inferior.

No caso de rochas ígneas félsicas, o eixo horizontal de $SSI=0$ corresponde à barreira térmica entre quartzo e nefelina. A faixa entre rochas subsaturadas e supersaturadas é muito estreita. Entretanto, existe uma distância entre rochas peralcalinas e peraluminosas e, portanto a barreira térmica entre egrina e muscovita não está presente exatamente no eixo vertical de $(Na+K)/Al=1,0_{mol.}$

Devido à barreira térmica, não há séries de cristalização fracionada que cruzam o eixo horizontal

de SSI=0 e pouco provável aquelas que cruzam com o eixo vertical $(Na+K)/Al=1,0_{mol.}$. A Figura 14 apresenta que as rochas alcalinas félsicas do Estado do Rio de Janeiro formam uma seqüência de alta convergência linear, com o R_2 de 0,8004, que cortam indubitavelmente ambos os eixos. Este fato aponta que a variação geoquímica é devida à mistura física das composições subsaturado peralcalino do magma alcalino félsico e supersaturado não peralcalino da rocha encaixante da crosta continental.

9 Relação entre a Cristalização e a Assimilação

Conforme as explicações anteriores, a evolução geoquímica dos magmas de rochas alcalinas félsicas do Estado do Rio de Janeiro é atribuída tanto à cristalização fracionada quanto à assimilação da crosta continental. O diagrama do sistema residual de SiO_2 - $NaAlSi_3O_8$ - $KAlSi_3O_8$ (Schairer & Bowen, 1935, Hamilton & MacKenzie, 1960) apresenta a relação entre os dois (Figura 15).

No diagrama, a maioria dos dados é projetada na proximidade ou no lado superior da curva cotéctica de $H_2O=1 kb$. Considerando a profundidade de intrusão, em torno de 3 km (Motoki & Sichel, 2006, Motoki *et al.*, 2007b), considera-se que a pressão de 1 kb é razoável. Algumas amostras estão sobre a barreira térmica de feldspato alcalino, com destaque daquelas do Complexo Intrusivo do Soarinho.

Duas amostras do Complexo Intrusivo de Tanguá, uma de Itaúna e uma de Morro de São João se projetam no lado inferior da curva cotéctica, ou seja, no domínio de leucita normativa. Estes corpos intrusivos têm ocorrências locais de pseudoleucita. Através da cristalização de leucita, o magma se evoluiu em direção à curva cotéctica, diminuindo a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$. Sichel *et al.* (2011) chamou este processo de Estágio 1 (Figura 15B).

Na linha cotéctica, cristalizou-se o feldspato alcalino da composição correspondente a *Afp* (Figura 15B), em torno de 75% de ortoclásio e 25% de albita, e o magma se evoluiu ao ponto tríplice reduzindo a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$. Em condição de $H_2O=1 kb$, o ponto tríplice não é da temperatura mínima. Portanto, o magma se evoluiu à esquerda da figura em direção ao ponto da temperatura mínima, *Ns* da Figura 15B, cristalizando feldspato alcalino e solução-sólida de nefelina, abaixando mais ainda a proporção $K_2O/(K_2O+Na_2O)$. Este procedimento é denominado Estágio 2.

Os magmas com composição de nefelina sienito, que estão no Estágio 2, podem assimilar a rocha encaixante da crosta continental. Este processo levou o magma em direção aos campos supersaturados em sílica, ou seja, de baixo para cima do diagrama. Desta forma, o magma se afastou da linha cotéctica e foi induzido ao rumo do ponto de temperatura mínima do campo saturado, *Gr* da

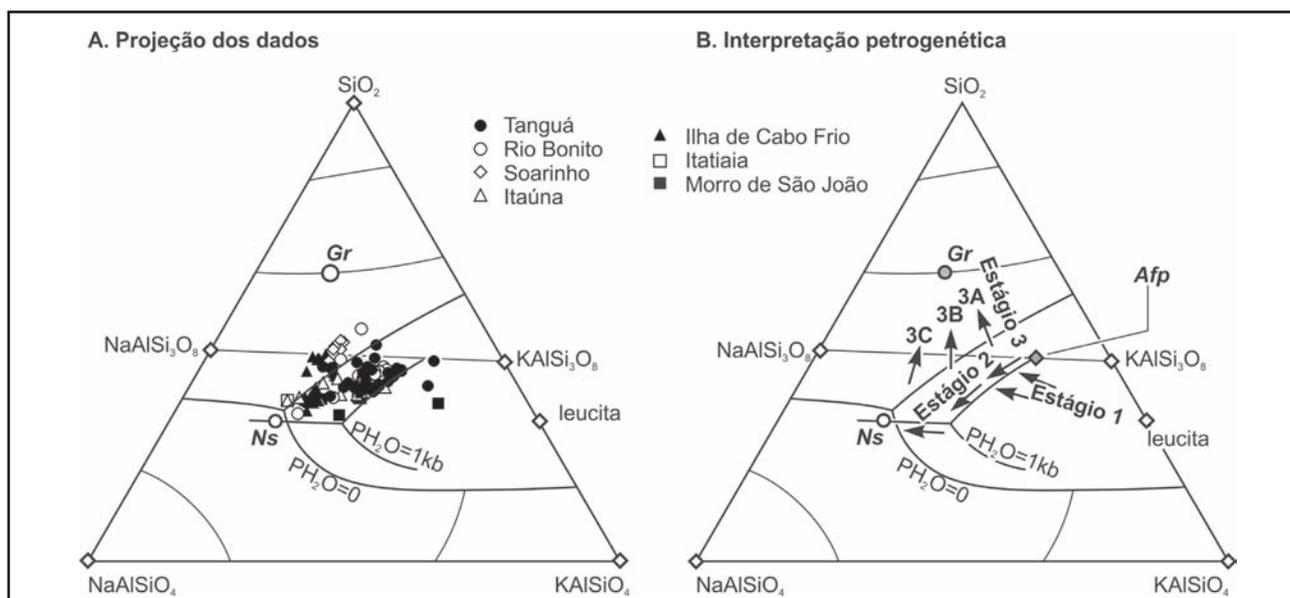


Figura 15 Projeção de composições químicas normativas das rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro no diagrama residual de SiO_2 - $NeAlSi_3O_8$ - $KAlSi_3O_8$ em peso (A; Schairer & Bowen, 1935, Hamilton & MacKenzie, 1960) e sua interpretação petrogenética (B; Motoki *et al.*, 2010; Sichel *et al.*, 2011). Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

Figura 15B. A assimilação da rocha encaixante é observada nos afloramentos da zona de contato dos corpos intrusivos na forma de xenólitos semi-assimilados pelo magma (Sichel *et al.*, 2011). Este processo é chamado de Estágio 3.

As observações individuais das composições químicas de cada corpo intrusivo revelam os detalhes sobre o Estágio 3. O Complexo de Tanguá tem 2 amostras no domínio de leucita com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,78 a 0,82. Estas estão no Estágio 1. As 12 amostras deste corpo estão sobre a linha cotéctica de $H_2O=1$ kb com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,59 a 0,72. Essas estão no Estágio 2. As 17 amostras estão no Estágio 3 e têm a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,51 a 0,65. A assimilação da crosta ocorreu na fase inicial do Estágio 2, que corresponde às setas pretas de 3A e 3B. O grau de assimilação é até 38% (Figura 16A).

O Complexo Rio Bonito não tem amostras do Estágio 1. As 18 amostras com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,58 a 0,67 estão configuradas paralelamente à

curva cotéctica. Esta posição corresponde à curva cotéctica de $H_2O=0,7$ kb, portanto este magma poderia não estar subsaturado totalmente em água. As 4 amostras com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,46 a 0,61 estão no Estágio 3, com o grau máximo de 48%. A assimilação ocorreu na fase inicial do Estágio 2, correspondente ao 3A e 3B. Excepcionalmente, uma amostra permaneceu no Estágio 2 até a proximidade do ponto *Ns*, com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,41 (Figura 16B).

Por outro lado, todas as amostras do Complexo Soarinho estão sob forte efeito de assimilação continental, de grau variando de 41 a 54%. Não há amostras do Estágio 1 e 2. A assimilação ocorreu na fase mais avançada, com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,49 a 0,54, que corresponde à 3B (Figura 16C). As amostras da Ilha de Cabo Frio também são caracterizadas pelo alto grau de assimilação continental, de 8 a 46%. A assimilação ocorreu na fase bem avançada no Estágio 2, com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,42 a 0,52 (Figura 16D).

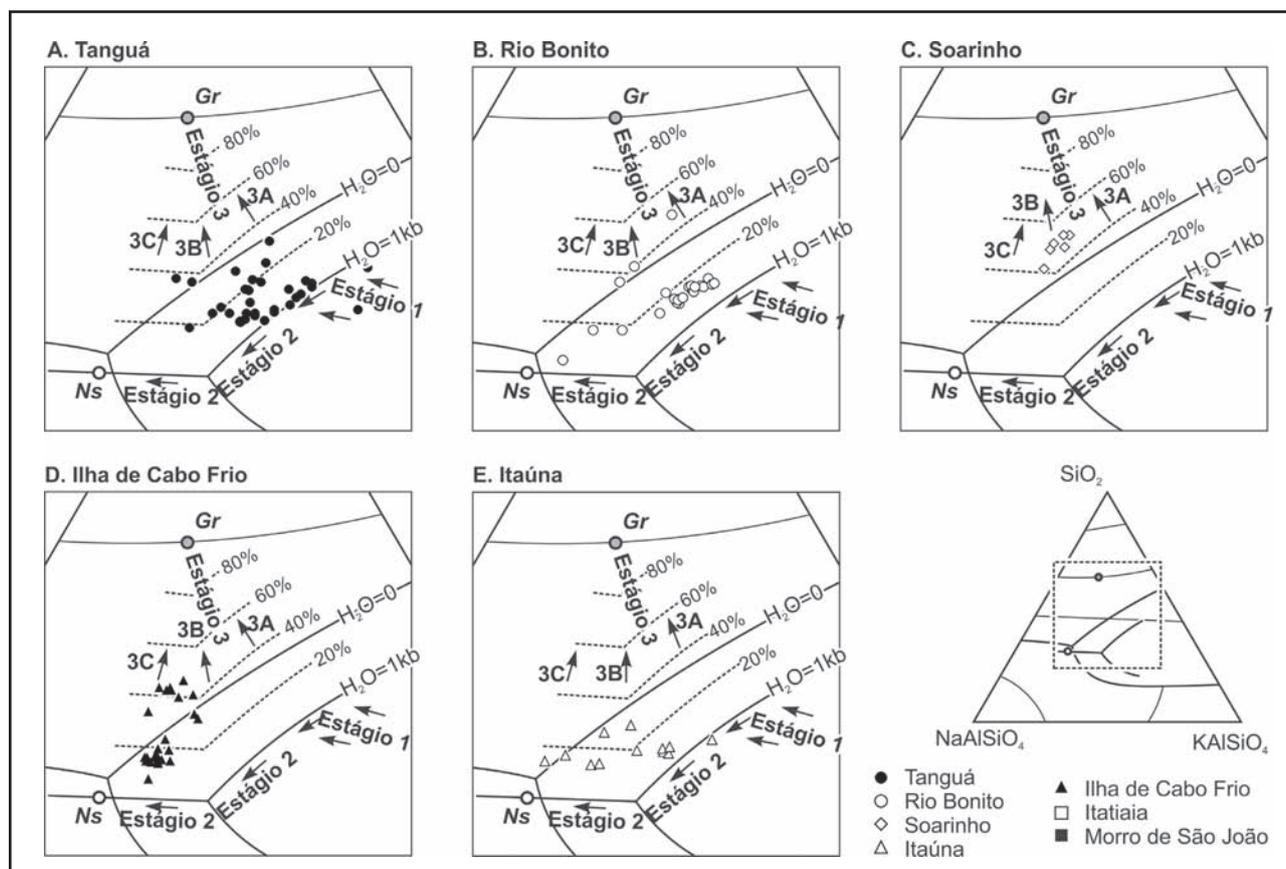


Figura 16 Cristalização fracionada e assimilação da crosta continental que são expressas no diagrama residual de SiO_2 - $NaAlSiO_4$ - $KAlSiO_4$ (Schaier & Bowen, 1935; Hamilton & MacKenzie, 1960) para as rochas alcalinas dos complexos intrusivos de: (A) Tanguá; (B) Rio Bonito; (C) Soarinho; (D) Ilha de Cabo Frio; (E) Itaúna. As curvas tracejadas apresentam porcentagem da assimilação. Os dados são originados das mesmas fontes da Figura 7.

O Complexo Itaúna possui 1 amostra no Estágio 1, com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,67 e, 4 amostras no Estágio 2, com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ em torno de 5,9. O Estágio 3 aconteceu em uma ampla faixa, com a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ de 0,35 a 0,53. O grau de assimilação é baixo, de 13 a 27% (Figura 16E).

As observações acima constam que a assimilação da crosta continental ocorreu em diversas fases no Estágio 2: No início em Tanguá e Rio Bonito; no médio em Soarinho; no final na Ilha de Cabo Frio. Os complexos intrusivos de Rio Bonito e Itaúna sugerem mais de um evento de assimilação dentro do mesmo corpo intrusivo.

10 Super-Reaquecimento Magmático

O líquido gerado pela fusão parcial da crosta continental é supersaturado em sílica. Desde que a fusão ocorre pelo calor do magma subsaturado presente na linha cotética, a taxa da fusão parcial é baixa e a composição não muito diferente do ponto de temperatura mínima, que se situa no *Gr* da Figura 15 e 16. Entretanto a mistura física dos líquidos subsaturado e supersaturado não pode formar um magma de composição intermediária, que corresponde a álcali sienito e traquito. A composição intermediária é termodinamicamente instável e a temperatura para a consolidação deste magma é mais alta do que o líquido que está na curva cotética. Quando ocorre a mistura, cristaliza-se feldspato alcalino consumindo totalmente o líquido granítico gerado pela fusão da rocha encaixante. Para formar o magma traquítico, é necessário o superaquecimento magmático de temperatura relativa superior a 50°C (Hamilton & MacKenzie, 1960).

Brotzu *et al.* (1997) interpretou a origem dos magmas de álcali sienito, quartzo sienito e álcali granito do Complexo Intrusivo de Itatiaia como devida à alta temperatura do magma pouco fracionada do Estágio 1 com leucita normativa, que fundiu a rocha encaixante. Por causa do magma alcalino quente, formaram-se os magmas superaquecidos de álcali sienito e quartzo sienito, ultrapassando a barreira térmica, isto é, a assimilação ocorreu durante o Estágio 1, e não, Estágio 2. Este modelo é teoricamente possível e, neste caso, as rochas formadas pela assimilação devem ter composições correspondentes à 3A.

Entretanto, os dados geoquímicos indicam que tanto no Complexo Intrusivo de Itatiaia quanto

nos outros complexos do Estado do Rio de Janeiro, a assimilação continental ocorreu em diversas fases do Estágio 2, que é evidenciado pela existência das rochas de composições correspondentes à 3A, 3B e 3C (Figura 17). Este ponto é desfavorável para o modelo acima.

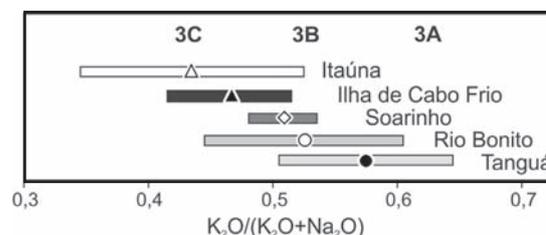


Figura 17 Faixa da $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ em que ocorreu assimilação da crosta continental no magma de nefelina sienito dos complexos intrusivos do Estado do Rio de Janeiro.

Por outro lado, Motoki (1986), Motoki *et al.* (2010) e Sichel *et al.* (2011) propuseram o modelo de super-reaquecimento magmático. Neste modelo, o magma concluiu o Estágio 1 e chegou até a curva cotética. Durante o Estágio 2, ocorreu a assimilação por reaquecimento magmático causado, provavelmente, à injeção de um novo pulso de magma na câmara magmática ainda não consolidada.

O álcali sienito da Ilha de Vitória, SP, apresenta clinopiroxênio e minerais opacos com forma refundida, até esquelética (Motoki, 1986), sugerindo super-reaquecimento magmático. A textura similar é observada na Ilha de Cabo Frio (Araújo, 1995). Observam-se, também, os cristais de clinopiroxênio com a borda de anfibólio, bem como, o pseudomorfo de anfibólio segundo clinopiroxênio. Os cristais de anfibólio dos complexos intrusivos de Mendanha e Tanguá são curtos e largos, de forma correspondente a clinopiroxênio, portanto podem ser pseudomorfo. A transformação de clinopiroxênio em anfibólio sugere aumento de pressão de H_2O no magma após a cristalização do clinopiroxênio. Esta água poderia ser originada da rocha encaixante fundida. A Ilha de Vitória (Motoki, 1986) e de Cabo Frio (Sichel *et al.*, 2011) expõem afloramentos da zona de contato apresentando o processo de intensa fusão da rocha encaixante. O modelo de super-reaquecimento magmático e consequente fusão da rocha encaixante podem gerar o magma de composições correspondentes a álcali sienito e traquito, sem controvérsia termodinâmica.

Ocorrido o super-reaquecimento magmático, as estruturas anteriores do contato intrusivo são

termicamente eliminadas e torna-se difícil estudar o processo do reaquecimento por meios geológicos. Entretanto, existem alguns indícios. Junto com os corpos intrusivos de nefelina sienito e álcali sienito, ocorrem diques de rochas alcalinas máficas, chamadas de lamprófito. Estes são encontrados na Ilha de Cabo Frio, Mendanha e Ilha de Vitória. Além disso, ocorrem xenólitos rochas alcalinas máficas e ultramáficas no Morro de São João, Ilha de Cabo Frio e Ilha de São Sebastião, SP. As observações de campo afirmam que a maioria das rochas de composição intermediárias apresentadas na Figura 7 é o xenólito semi- assimilado pelo magma de nefelina sienito. Os magmas máficos e ultramáficos têm temperatura elevada. Caso tais magmas foram injetados na câmara magmática ainda não consolidada, poderia provocar super-reaquecimento magmático com a diferença térmica superior a 50°C, dando a origem dos magmas de álcali sienito e traquito.

11 Conclusões

Os dados geoquímicos, descrições petrográficas e observações de campo das rochas alcalinas félsicas dos complexos intrusivos do Estado do Rio de Janeiro apresentam as seguintes conclusões:

1. As rochas alcalinas félsicas são geralmente subsaturadas em sílica, sendo classificadas como nefelina sienito e fonolito. Uma parte não possui feldspatóides e classificada como álcali sienito e traquito. A proporção $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ é alta e as rochas são classificadas como da série potássica e ultrapotássica. A taxa de $Al/(Na+K)_{mol}$ é moderada, sendo rochas metalcalinas. Uma parte das rochas é peralcalina.
2. Os diagramas de variação para os elementos principais indicam cristalização fracionada de clinopiroxênio, anfibólio, titanita, ilmenita e apatita. Observam-se duas séries de cristalização fracionada, uma para as rochas alcalinas máficas e intermediárias que é caracterizada por cristalização de minerais máficos, e outra para as rochas alcalinas félsicas, de leucita e feldspato alcalino. Através do fracionamento magmático, as rochas alcalinas félsicas reduzem a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$.
3. Para as rochas alcalinas félsicas, de composição correspondente a nefelina

sienito, a $K_2O/(K_2O+Na_2O)$ funciona como um índice de cristalização fracionada. Através de cristalização fracionada o magma torna-se mais peralcalino, abaixando a $Al/(Na+K)_{mol}$.

4. O fracionamento do magma ocorre por duas formas diferentes, cristalização fracionada e assimilação da rocha encaixante da crosta continental. O diagrama do SSI apresenta uma seqüência com alta convergência linear para as rochas alcalinas félsicas. Esta seqüência corta a barreira térmica, apontando forte efeito da assimilação.
5. A evolução geoquímica do magma alcalino félsico ocorre em três estágios: 1) Cristalização de leucita no campo de leucita normativa; 2) Cristalização de feldspato alcalino na linha cotética; 3) Assimilação da crosta continental e a consequente transformação da composição de subsaturada em supersaturada, cruzando a barreira térmica. A taxa de assimilação é alta, chegando até 54%.
6. A assimilação da crosta continental correu em diversas fases do Estágio 2, desde o início até o final. Este fato é favorável para o modelo de super-reaquecimento magmático através de injeção de novos pulsos de magma na câmara magmática ainda consolidada. O processo acima explica a origem dos magmas de álcali sienito e traquito, que estão no campo de instabilidade termodinâmica.

12 Homenagem

Este artigo é dedicado ao falecido Professor Doutor Joel de Gomes Valença, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seus estudos das rochas alcalinas félsicas do Estado do Rio de Janeiro foram importantes temas para sua vida científica. Os autores manifestam a gratidão e o respeito, oferecendo essa homenagem ao professor.

13 Agradecimentos

O presente trabalho é a soma dos resultados de alguns projetos sob o financiamento da FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Carlos Chagas Filho), como o processo E26/110.778/2009, e da PETROBRAS, "Monitoramento ambiental de parâmetros do COMPERJ". As análises químicas foram realizadas

no GEOSOL Ltda. Belo Horizonte. O manuscrito é baseado no trabalho apresentado em 11 de novembro de 2011 no 12º Simpósio de Geologia do Sudeste na cidade de Nova Friburgo, RJ, (Sichel *et al.*, 2011) e foi escolhido pela Comissão Organizadora para a submissão do trabalho completo. Os autores estão gratos a essas instituições.

14 Referências

- Aires, J.R.; Motoki, A.; Motoki, K.F.; Motoki, D.F. & Rodrigues, J.G. 2012. Análises geomorfológicas do Plato de Teresópolis e da Serra do Mar, RJ, com o auxílio de seppomen e ASTER GDEM e sua relação aos tectonismos cenozóicos. *Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 35(2): 105-123.(nesta edição)
- Araújo, A.L. 1995. *Geologia, geoquímica e petrologia das rochas alcalinas da Ilha do Cabo Frio e das áreas continentais adjacentes, Arraial do Cabo - RJ*. Programa de Pós-graduação em Geologia. Universidade Federal Fluminense, Dissertação de Mestrado, 114 p.
- Arena, M.C.; Valente, S.C.; Silveira, L.S.; Dutra, T.; Corval, A. & Ragatky, C.D. 2006. Aspectos petrográficos e geoquímicos preliminares das suítes alcalinas sieníticas e traquíticas da porção setentrional do complexo vulcânico de Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. *Arquivos do Museu Nacional, Rio de Janeiro*, 64 (4): 333-359.
- Batchelor R.A. & Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoids rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48:216-221.
- Brotzu, P.; Beccaluva, L.; Conte, A.; Fonseca, M.; Garbarino, C.; Gomes, C.B.; Leong, R.; Macciotta, G.; Mansur, R.L.; Melluso, L.; Morbidelli, L.; Ruberti, E.; Sigolo, J.B.; Traversa, G. & Valença, J.G. 1989. Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. The syenitic intrusion of Morro Redondo, RJ. *Geochimica Brasiliensis*, 3: 63-80.
- Brotzu, P.; Gomes, C. B.; Melluso, L.; Morbidelli, L.; Morra, V. & Ruberti, E. 1997. Petrogenesis of coexisting SiO₂-undersaturated to SiO₂-oversaturated felsic igneous rocks: the alkaline complex of Itatiaia, southern eastern Brazil. *Lithos*, 40: 133-156.
- Brotzu, P.; Melluso, L.; Bennio, L.; Gomes, C.B.; Lustrino, M.; Morbidelli, L.; Morra, V.; Ruberti, E.; Tassinari, C. & D'Antonio, M. 2007. Petrogenesis of the Early Cenozoic potassic alkaline complex of Morro de São João, southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 24: 93-115.
- Derby, O.A. 1897. On nepheline-rocks in Brazil - part II. The Tinguá Mass. *The Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 47: 251-265.
- Ferrari, A.L.; Dupuy, S.S. & Brenner, T.L. 1977. Ocorrência de rocha alcalina no município de Piraí, RJ, e sua relação com o lineamento de Além Paraíba (nota preliminar). *Anuário do Instituto de Geociências*. 1: 114-121.
- Furlong, K.P. & Myers, J.D. 1985. Thermal-mechanical modeling of the role of thermal stresses and stoping in magma contamination. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 24 (1-2): 179-191.
- Hamilton, D.L. & MacKenzie, W.S. 1960. Nepheline solid solution in the system NaAlSiO₄-KAlSiO₄-SiO. *Journal of Petrology*, 1: 56-72.
- Harker, A. 1909. *The natural history of igneous rocks*. New York, Macmillan Co., 384 p.
- Heilbron, M. & Machado, N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, 125: 87-112.
- Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, A. & Zanettin, B. 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks based on the Total-Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.
- Maniar, P.D. & Piccoli, P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101:635-643.
- Middlemost, E.A.K. 1975. The basalt clan. *Earth Science Reviews*, 11: 337-364.
- Miyashiro, A. & Kushiro, I. 1977. *Gansekigaku III, Ganseki no Seiin (Petrologia III, Gêneses de rochas)*. Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 246p.
- Mota, C.E.M.; Geraldés, M.C.; Almeida, J.C.H.; Vargas, T.; Souza, D.M.; Loureiro, R.O. & Silva, A.P. 2009. Características Isotópicas (Nd e Sr), Geoquímicas e Petrográficas da Intrusão Alcalina do Morro de São João: Implicações Geodinâmicas e Sobre a Composição do Manto Sublitosférico. *Revista do Instituto de Geociências - USP, Série Científica*, 9 (1): 85-100.
- Motoki, A. 1986. *Geologia e Petrologia do Maciço Alcalino da Ilha de Vitória, SP*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 245p.
- Motoki, A. & Sichel, S.E. 2006. Avaliação de aspectos texturais e estruturais de corpos vulcânicos e subvulcânicos e sua relação com o ambiente de cristalização, com base em exemplos do Brasil, Argentina e Chile. *REM-Revista Escola de Minas*, 59 (1): 13-23.
- Motoki, A. & Sichel, S.E. 2008. Hydraulic fracturing as possible mechanism of dyke-sill transition and horizontal discordant intrusion: an example of Arraial do Cano area, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geofísica Internacional*, Ciudad del México, 47 (1): 13-25.
- Motoki, A.; Soares, R.S.; Netto, A.M.; Sichel, E.S.; Aires, J.R. & Lobato, M. 2007a. Geologic occurrence shape of pyroclastic rock dykes in the Dona Eugênia River Valley, Municipal Park of Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. *Geociências*, 26 (1): 67-82.
- Motoki, A.; Soares, R.S.; Netto, A.M.; Sichel, S.E.; Aires, J.R. & Lobato, M. 2007b. Genetic reconsideration of the Nova Iguaçu Volcano model, State of Rio de Janeiro, Brazil: eruptive origin or subvolcanic intrusion? *REM-Revista Escola de Minas*, 60 (4): 583-592.
- Motoki, A.; Soares, R.S.; Lobato, M.; Sichel, E.S. & Aires,

- J.R. 2007c. Weathering fabrics in felsic alkaline rocks of Nova Iguaçu, State of Rio de Janeiro, Brazil. *REM-Revista Escola de Minas*, 60 (3): 451-458.
- Motoki, A.; Sichel, S.E.; Soares, R.S.; Neves, J.L.P. & Aires, J.R. 2008a. Geological, lithological, and petrographical characteristics of the Itaúna Alkaline Intrusive Complex, São Gonçalo, State of Rio de Janeiro, Brazil, with special attention of its emplacement mode. *Geociências*, 27 (1): 33-44.
- Motoki, A.; Petrakis, G.H.; Sichel, S.E.; Cardoso, C.E.; Melo, R.C.; Soares, R.S. & Motoki, K.F. 2008b. Landform origin of the Mendanha Syenitic Massif, State of Rio de Janeiro, Brazil, based on the geomorphological analyses by summit level map technique. *Geociências*, 27 (1): 99-115.
- Motoki, A.; Sichel, S.E.; Savi, D.C. & Aires, J.R. 2008c. Intrusion mechanism of tabular intrusive bodies of subhorizontal discordant emplacement of the Cabo Frio Island and the neighbour areas, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geociências*, 27 (2): 207-218.
- Motoki, A., Sichel, S.E., Soares, R.S., Aires, J.R., Savi, D.C., Petrakis, G.H. & Motoki, K.F. 2008d. Vent-filling pyroclastic rocks of the Mendanha, the Itaúna, and the Cabo Frio Island, State of Rio de Janeiro, Brazil, and their formation process based of the conduit implosion model. *Geociências*, 27 (3): 451-467.
- Motoki, A.; Sichel, S.E. & Petrakis, G.H. 2009. Genesis of the tabular xenoliths along contact plane of the mafic dykes of cabo frio area, state of Rio de Janeiro, Brazil: Thermal delamination or hydraulic shear fracturing? *Geociências*, 27 (2): 207-218.
- Motoki, A.; Sichel, S.E.; Vargas, T.; Aires, J.R.; Iwanuch, W.; Mello, S.L.M.; Motoki, K.F.; Silva, S.; Balmant, A. & Gonçalves, J. 2010. Geochemical evolution of the felsic alkaline rocks of Tanguá, Rio Bonito, and Itaúna intrusive bodies, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geociências*, 29 (3): 291-310.
- Motoki, A.; Vargas, T.; Iwanuch, W.; Sichel, S.E.; Balmant, A. & Aires, J.R. 2011. Tectonic breccia of the Cabo Frio area, State of Rio de Janeiro, Brazil, intruded by Early Cretaceous mafic dyke: Evidence of the Pan-African brittle tectonism ? *REM-Revista Escola de Minas*, 64 (1): 5-36.
- Motoki, A.; Vargas, T.; Iwanuch, W.; Melo, D.P.; Sichel, S.E.; Balmant, A.; Aires, J.R. & Motoki, K.F. 2012. Terremoto fóssil evidenciado pela brecha tectônica silicificada da área de Cabo Frio, RJ, e sua relação com a gênese do movimento intermitente da falha e o hidrotermalismo amagmático associado. *Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro*. 35-2, 124-139. (nesta edição)
- Motoki, A.; Geraldês, M.C.; Iwanuch, W.; Vargas, T.; Motoki, K.F.; Balmant, A. & Ramos, M.N. 2012b. Pyroclastic dyke and welded crystal tuff of the Morro dos Gatos alkaline intrusive complex, State of Rio de Janeiro, Brazil. *REM-Revista Escola de Minas*, 65 (1): 35-45.
- Motoki, A.; Campos, T.F.C.; Fonseca, V.P. & Motoki, K.F. 2012c. Subvolcanic neck of Cabugi Peak, State of Rio Grande do Norte, Brazil, and origin of its landform. *REM-Revista Escola de Minas*, 65 (2): 195-206.
- Penha, H.M. & Wiedemann, C.M. 1984. Granitóides da região central do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, *Roteiro de excursão*. Rio de Janeiro, 12: 5433-5459.
- Petrakis, G.H.; Motoki, A.; Sichel, S.E.; Zucco, L.L.; Aires, J.R. & Mello S.L.M. 2010. Ore geology of special quality gravel and artificial sand: examples of alkaline syenite of Nova Iguaçu, State of Rio de Janeiro, and rhyolite of Nova Prata, State of Rio Grande do Sul, Brazil. *Geociências*, 29 (1): 21-32.
- Ribeiro Filho, E. 1964. Geologia e petrologia dos maciços alcalinos do Itatiaia e Passa-Quatro (Sudeste do Brasil). *Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras da Universidade de São Paulo, Boletim, Geologia*, 304 (22): 5-93.
- Rodrigues, B. 1978. Processos de evolução magmática no Complexo Alcalino do Nejolo. *Boletim de Museu, Laboratório de Mineralogia e Geologia da Faculdade de Ciência*. Lisboa, 15: 1-171.
- Rodrigues, B. 1982. "Endo e Exofenitização" *Memorial da Academia de Ciências de Lisboa, Tomo XXIV*: 263-302.
- Schairer, J.F. & Bowen, N.L. 1935. Preliminary report on equilibrium-relations between feldspaths, alkali-feldspar, and silica, In: AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 16th Annual Meeting, *Transactions*: 325-328.
- Schairer, J.F. & Bowen, N.L. 1956. The system Na₂O-Al₂O₃-SiO₂. *American Journal of Science*, 254: 129-195.
- Schmitt, R.S.; Trouw, R.A.J.; Van Schmus W.R. & Pimentel, M.M. 2004. Late amalgamation in the central part of West Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collisional orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil). *Precambrian Research*, 133: 29-61.
- Shand, S.J. 1927. *Eruptive rocks: Their genesis, composition, and classification, with a chapter on meteorites*. John Wiley & Sons, New York, 360 p.
- Sichel, S.E.; Motoki, A.; Savi, D.C., & Soares, R.S. 2008. Subvolcanic vent-filling welded tuff breccia of the Cabo Frio Island, State of Rio de Janeiro, Brazil. *REM-Revista Escola de Minas*, 61 (4): 423-432.
- Sichel, S.E.; Motoki, A.; Arajujo, A.L.; Motoki, K.F. 2011. Evolução geoquímica e idade Rb-Sr do nefelina sienito da Ilha de Cabo Frio, RJ: superaquecimento magmático e assimilação da crosta continental. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 12, Nova Friburgo, SBG, *Boletim de Resumos*, CD: 175.
- Streckeisen, A.L. 1973. Plutonic rocks - classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks: *Geotimes*, 18 (10): 26-30.
- Thornton, C.P. & Tuttle, O.F. 1960. Chemistry of igneous rocks, part I. Differentiation index. *American Journal of Science*, 258: 664-684.
- Ulbrich, H.H.G.J. 1984. *A petrografia, a estrutura e quimismo*

- de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de Livre Docencia em Geologia. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 360p.*
- Valença J.G. & Edgar, A.D. 1979. Pseudoleucites of Rio de Janeiro State, Brazil. *American Mineralogist*, 64: 733-735.
- Valença J.G. 1980. *Geology, petrography and petrogenesis of some alkaline igneous complexes of Rio de Janeiro State, Brazil*. Thesis, Doctor in Geosciences. West Ontario University, London, Ontario, Canada, 247p.
- Yoshinobu, A.S.; Fowler, T.K.; Paterson, S.R.; Llambias, E.; Tickyj, H. & Sato, A.M. 2003. A view from the roof: magmatic stoping in the shallow crust, Chita pluton, Argentina. *Journal of Structural Geology*, 25 (7): 1037-1048.
- Žák, J.; Holub, F.V. & Kachlík, V. 2006. Magmatic stoping as an important emplacement mechanism of Variscan plutons: evidence from roof pendants in the Central Bohemian Plutonic Complex (Bohemian Massif). *International Journal of Earth Sciences*, 95 (5): 771-789.