QUÍMICA MINERAL E EVOLUÇÃO PETROLÓGICA DO MAGMATISMO ALCALINO NEOPROTEROZOICO DO MACIÇO SÃO JOSÉ DE CAMPESTRE (RN-PB), EXTREMO NE DA PROVÍNCIA BORBOREMA*

MARCOS ANTONIO LEITE DO NASCIMENTO¹, ZORANO SÉRGIO DE SOUZA^{1,3},
RIELVA SOLIMAIRY CAMPELO DO NASCIMENTO² & ANTONIO CARLOS GALINDO¹

Abstract MINERAL CHEMISTRY AND PETROLOGIC EVOLUTION OF THE NEOPROTEROZOIC ALCALINE MAGMATISM IN THE SÃO JOSÉ DE CAMPESTRE MASSIF (RN-PB), NORTHEAST BORBOREMA PROVINCE The southern portion of the São José de Campestre massif (NE Borborema Province) comprises a number of granitic rocks of alkaline affinity, associated with ductile shear zones of Neoproterozoic age. These bodies are constituted by rocks with very similar petrographic and textural features. They consist essentially of hololeucocratic, white to pink alkali-feldspar granites with equigranular fine- to medium-grained texture. Feldspar (microcline and albite) and quartz, make up about 90 weight %. The main mafic phase is clinopyroxene of the types aegirine-augite or hedenbergite, in addition to accessory amounts of garnet, sphene, allanite, zircon, apatite and magnetite.

Microprobe analyses corroborate the petrographic distinction of clinopyroxenes into two types. In garnet bearing rocks, the pyroxene is hedenbergite, whereas in rocks with no garnet the pyroxene is aegirine-augite. Garnet is andradite rich (88-92 mol%), with subordinate amounts of the grossular, spessartine and almandine components. Plagioclase shows a remarkable uniformity in composition ranging from 0 to 9 mol% anorthite, with the more calcium rich individuals found in rocks with garnet. The oxides are always Ti-poor magnetite.

Chemically, the studied rocks show similarities with high silica (>70%) and high alkali granites. They are metaluminous to slightly peraluminous, with $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ higher than 8%, higher values of Fe number ($\text{Fe}\# = 64-100$) and on agpaitic index less than 1.0. These geochemical features are typical of the classical alkaline granitic suites. On the other hand, the low amounts of Nb, Ga, Y, Rb and Zr, as well as the very high Sr, low total rare earth elements and positive Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.5-2.9$) are not compatible with the traditional alkaline magmas. The integration of petrographic and geochemical data suggests the fractional crystallization as the main petrogenetic process. Some mass balance calculations and trace element modeling point to less than 10% fractionation, of a cumulate composed of clinopyroxene, plagioclase, magnetite and zircon.

Keywords: Alkaline Granitoids, Brasiliana Orogeny, Mineral Chemistry, Petrologic Evolution.

Resumo A porção sul do Maciço São José de Campestre (NE da Província Borborema) caracteriza-se por apresentar um conjunto de rochas granitóides alcalinas, associadas a zonas de cisalhamento dúctil do final do Neoproterozóico. Dentre estes corpos, os mais conhecidos são os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Japi. No presente trabalho, discutem-se dados de química mineral e a evolução petrológica dos três primeiros corpos.

As rochas desses corpos alcalinos apresentam uma grande similaridade petrográfica e textural. São rochas hololeucocráticas, de coloração rósea a cinza esbranquiçada, textura equigranular fina a média, de composição predominante álcali-feldspato granito. Contêm grandes quantidades de feldspatos (microclina e albita) e quartzo, perfazendo valores modais acima de 90%. O principal mineral máfico é o clinopiroxênio do tipo aegirina-augita ou hedenbergita, ocorrendo ainda como acessórios granada, titanita, allanita, zircão, apatita e magnetita.

Análises por microsonda eletrônica corroboram a separação do clinopiroxênio em dois grupos diferentes, em concordância com a paragéneses máfica encontrada. Em rochas com granada, o clinopiroxênio é do tipo hedenbergita; já na ausência de granada, o clinopiroxênio é aegirina-augita. As granadas são enriquecidas em moléculas de andradita, podendo conter quantidades menores de grossulária, espessartina e almandina. Os plagioclásios, a exemplo dos clinopiroxênios, possuem composições químicas distintas, sendo mais enriquecidos em Ca nas amostras com granada. Os óxidos mostram composição de magnetita.

Quimicamente, esses granitóides classificam-se como alcalinas de alta sílica (>70% em peso), metaluminosas a fracamente peraluminosas, com altas quantidades de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (>8% em peso), valores elevados do número de Fe ($\text{Fe}\# = 64-100$) e índice agpático menor que 1,0. Entretanto, as baixas quantidades de Nb, Ga, Y, Rb e Zr, altos teores de Sr e anomalias positivas de Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.5-2.9$) não são condizentes com magmas alcalinos clássicos. A integração de dados petrográficos e geoquímicos sugere a ação de mecanismos de cristalização fracionada, com cumulados de clinopiroxênio, plagioclásio, magnetita e zircão, sob condições pelo menos parcialmente oxidantes.

Palavras-chave: Granitóides Alcalinos, Orogêneses Brasiliana, Química Mineral, Evolução Petroológica.

* Dados originais (tabelas completas) podem ser obtidos pelos interessados mediante e-mail do autor principal

1 - Departamento de Geologia, UFRN, Caixa Postal 1502, CEP 59.078-970, Natal/RN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, marcos@geologia.ufrn.br, zorano@geologia.ufrn.br, galindo@geologia.ufrn.br

2 - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte, 70910-900, Brasília/DF, rielva@unb.br

3 - Pesquisador do CNPq; Apoio CAPES/COFECUB

INTRODUÇÃO No extremo NE da Província Borborema (NE do Brasil), a orogenia Neoproterozóica (Brasiliana) é caracterizada por intenso magmatismo. Almeida *et al.* (1967) foram os primeiros a propor uma classificação tipológica para as rochas granitóides Brasilianas. Contribuições subsequentes (Sial 1987) detalharam essas rochas, com destaque para os granitóides do Domínio da Zona Transversal, a sul do Lineamento Patos. De acordo com Sial & Ferreira (1988), nesse domínio, as rochas alcalinas representam um grupo de especial importância, a exemplo do Plúton de Triunfo e dos granitóides do Tipo Catingueira.

No Maciço São José de Campestre (MSJC), a norte do Lineamento Patos, esse tipo de suíte plutônica é bem menos representado. A partir de 1993, dados petrográficos e estruturais permitiram identificar uma família de granitóides alcalinos ao longo do *splay* do Lineamento Patos, com *trend* NE (a Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos - ZCRP), e a norte desta, na região de Japi (Araújo *et al.* 1993, Hollanda *et al.* 1995, Trindade *et al.* 1995).

Esse magmatismo alcalino está representado pelos plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Japi (Fig. 1) (Nascimento *et al.* 1997, Nascimento *et al.* 1997, Hollanda 1998, Jardim de Sá *et al.* 1999) onde os três primeiros encontram-se alojados ao longo da ZCRP, que possui direção NE e cinemática transtraccional dextrógira, enquanto o Plúton Japi é adjacente a Zona de Cisalhamento Japi (ZCJ), de cinemática transcorrente sinistral. Esses corpos foram afetados em graus variados por um episódio tectônico-metamórfico (D_3/M_3), de alta temperatura e baixa pressão, correlacionado ao evento Brasiliano com pico em ± 550 Ma (Souza & Jardim de Sá 1993). Eles exibem tramas magmáticas de estado sólido e feições de alojamento sintectônico e, ao mesmo tempo, truncam estruturas mais antigas de ortognaisses do substrato gnáissico-migmatítico e de micaxistos correlatos ao Grupo Seridó.

Neste trabalho são reportadas as suas características mineralógicas, com a finalidade de identificar a história de cristalização do magmatismo alcalino no MSJC, dando destaque aos plútons Caxexa, Serra do Algodão e Serra do Boqueirão.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL REGIONAL Na região do MSJC, granitóides de idade neoproterozóica estão alojados em rochas do substrato gnáissico-migmatítico de idade arqueana a paleoproterozóica (Dantas 1997; Dantas *et al.* 1998) e/ou em faixas de micaxistos correlacionadas ao Grupo Seridó (Jardim de Sá 1994). Esse substrato é formado por ortognaisses de composição quartzo diorítica a granítica, variavelmente migmatizados (Souza *et al.* 1999). Os metassedimentos são compostos por granada-biotita xistos com raras lentes calciossilicáticas. Estruturas relacionadas com um evento dúctil D_2 estão registradas em ambas unidades (substrato gnáissico e pacote metapelítico), mas não estão presentes nos granitóides Brasilianos. Estruturas Brasilianas D_3 ocorrem sob condições de alta temperatura e baixa pressão (fácies anfibolito a granulito) com fusão parcial de micaxistos e ortognaisses do substrato (Souza & Jardim de Sá 1993) e controlam o posicionamento desses granitóides.

As estruturas Brasilianas encontradas a SE de Barra de Santa Rosa (PB), apresentam um comportamento ímpar. Elas são geometricamente variadas de acordo com o seu posicionamento com relação às zonas de maior intensidade da deformação transcorrente. As estruturas de baixo ângulo, tangenciais distensionais, são progressivamente verticalizadas quando se aproxima da ZCRP, onde adquirem direção NE-SW e alto ângulo de mergulho, com lineações mantendo obliquidade baixa, definindo desta forma uma geometria em flor negativa, associada a uma cinemática transtraccional

dextrógira (Trindade *et al.* 1995; Jardim de Sá *et al.* 1999).

ASPECTOS DE CAMPO De norte para sul, três corpos alcalinos se destacam: Caxexa, Serra do Algodão e Serra do Boqueirão (Fig. 2).

O **Plúton Caxexa** (Nascimento 2000) é um corpo alongado na direção N-S, com pequena inflexão para NE em sua porção norte. Possui aproximadamente 50 km² de área aflorante. Na extremidade sul do corpo, o contato se dá com os micaxistos e a norte com os ortognaisses. Este plúton encontra-se na parte lateral a norte da ZCRP, exibindo uma foliação magmática com mergulhos de ângulo baixo a moderado para oeste, lineação de obliquidade baixa a média ora para norte, ora para sul. Ele está alojado ao longo da interface milonítica entre os micaxistos e os ortognaisses.

Os **plútons Serra do Algodão e Serra do Boqueirão** (Nascimento 1998) compreendem corpos alongados segundo NE-SW, com cerca de 30 km² cada. O Plúton Serra do Algodão tem estrutura em antifórme isoclinal, estando o Plúton Serra do Boqueirão localizado na sua extensão para SW, este último com forma sigmoidal. Subordinadamente, podem ocorrer diques graníticos nos feixes de cisalhamento, chegando a atingir mais de 5 km de comprimento. Esses plútons cortam os micaxistos e os gnaisses do substrato e, eventualmente, contêm xenólitos miloníticos destes litotipos. Ambos corpos situam-se na porção central da ZCRP, caracterizando-se por foliação em alto ângulo contendo lineações com caimento suave e cinemática transcorrente dextral, dada por *boudins* sigmoidais de quartzo e planos S-C (Trindade *et al.* 1995).

PETROGRAFIA E TEXTURAS Os corpos estudados são petrográfica e texturalmente semelhantes, com composição modal e textura bastante homogênea. São hololeucocráticos, de coloração rósea a cinza esbranquiçada, e textura equigranular fina a média. Um bandamento composicional definido por variações nas proporções modais de clinopiroxênios ocorre com frequência. São álcali-feldspato granitos e, subordinadamente, quartzo álcali-feldspato sienitos (Streckeisen 1976).

A mineralogia dessas rochas compõe-se essencialmente de albita ($An_{0,9}$), microclina peritítica e quartzo, que perfazem mais de 90% da composição modal. O mineral máfico dominante é o clinopiroxênio, ocorrendo como acessórios titanita, granada, magnetita e raros allanita, zircão e apatita. Carbonato ocorre como produto da transformação de clinopiroxênios.

A microclina ocorre como grãos subédricos a anédricos, peritíticos, com geminação albita-periclínio. Localmente, cristais maiores apresentam textura poiquilítica com inclusões de plagioclásio, titanita e clinopiroxênio. O plagioclásio apresenta-se em dois tipos texturais: Pl_1 - cristais subédricos, com geminação polissintética e teores de anortita entre 4 e 7%, ocorrendo como inclusões nos cristais maiores de microclina. O Pl_2 - grãos dominantes, subédricos a anédricos, com geminação polissintética, composição $An_{0,9}$, e inclusões de zircão, titanita e apatita. O quartzo é anédrico, com extinção ondulante, por vezes desenvolvendo textura em mosaico poligonal.

O clinopiroxênio ocorre como dois tipos texturais distintos. A aegirina-augita está associada às fácies que não possuem granada, e varia de verde acastanhada a verde escura, com ângulo de extinção (Z^a) entre 5 e 20°. Já a hedenbergita é encontrada nas rochas com granada, tem coloração verde escura e ângulo de extinção (Z^c) de 35-50°. A granada é individualizada em dois tipos diferentes, a primeira ocorre associada com hedenbergita, exibe contatos interdigitados e possui hábito euédrico e cor ama-

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Província Borborema, destacando sua porção nordeste, área de ocorrência do Maciço São José de Campestre (MSJC) com a presença dos plútons alcalinos de Japi, Caxexa, Serra do Algodão e Serra do Boqueirão. ZCPJC – Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara; ZCRP – Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos.

Figura 2 - Mapa geológico da região entre Remígio e Barra de Santa Rosa, no Estado da Paraíba, com destaque dos granitóides Neoproterozóicos associados a Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (ZCRP).

relo clara. O segundo tipo possui cor amarelo escura, hábito tipicamente intersticial, esquelético ou em atol, contendo inclusões de plagioclásio e quartzo. Cristais de titanita são euédricos a subédricos, castanho escuros e com seção losangular típica.

O óxido é representado por cristais de magnetita, ocorrendo como seções quadradas. Allanita é encontrada como cristais euédricos a subédricos e apresenta cor amarelo acastanhada. Zircão e apatita representam cristais euédricos, inclusos em quartzo, feldspatos e clinopiroxênio.

Crítérios texturais indicam que apatita, zircão, allanita e magnetita são as fases mais precoces na sequência de cristalização seguidos por titanita, clinopiroxênio e Pl_1 , com o Pl_2 cristalizando logo em seguida. A granada é tardia, com relações texturais sugerindo sua formação, em parte, através da desestabilização do clinopiroxênio. A microclina e quartzo são os últimos minerais a cristalizar. Os granitos alcalinos do MSJC são, portanto, caracterizados por uma mineralogia anidra no decorrer de sua cristalização.

QUÍMICA MINERAL As análises químicas foram realizadas por microsonda eletrônica nas Universidades de Brasília (Brasil) e Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, França). Na primeira, usou-se o equipamento Cameca SX-50 com sistema EDS acoplado, condições operacionais de 15 kV de aceleração, corrente de 20 nA e tempo médio de integração de contagens de 10s. No segundo, o equipamento foi uma microsonda do tipo Camebax SX-100, com voltagem de 15 kV, corrente de 11 nA e tempo de contagem de 10s.

Para o cálculo das fórmulas estruturais foi aplicado o programa Minfile (Aiffé & Essene 1988). A fórmula dos piroxênios foi recalculada para 6 oxigênios, com o total de Al sendo distribuído entre os sítios tetraédrico e octaédrico, utilizando Al^{IV} para 2-Si e subtraindo esse Al^{IV} do total de alumínio, para obter o Al^{VI} . A fórmula da granada foi recalculada para 24 oxigênios e óxidos e plagioclásio recalculados para 32 e 8 oxigênios, respectivamente.

Clinopiroxênio A composição química varia de acordo com a paragênese máfica associada (Tabela 1). Em rochas com granada e titanita, o clinopiroxênio é mais rico em Ca (0,814-0,869 pfu), Mg (0,164-0,285 pfu) e Fe^{+2} (0,532-0,641 pfu), e pobre em Na (0,112-0,159 pfu) e com menor razão $Fe/(Fe+Mg)$ (0,81-0,89 pfu), quando comparado ao de rochas cuja paragênese máfica apresenta apenas titanita. Nestes últimos o clinopiroxênio possui teores de Ca de 0,553-0,625 pfu, Mg de 0,098-0,187 pfu, Fe^{+2} de 0,319-0,556 pfu, Na de 0,324-0,453 pfu e a razão $Fe/(Fe+Mg)$ é de 0,90-0,94.

A classificação dos piroxênios baseia-se nos critérios de Morimoto (1988), onde os mesmos são individualizados em quatro tipos: Ca-Mg-Fe (Quad), Ca-Na, Na e outros. Inicialmente, utilizam-se os parâmetros Q ($Ca+Mg+Fe^{+2}$) vs. J (2Na), com base no número total de cátions nas posições octaédricas M_1 e M_2 para distinguir os piroxênios do tipo Quad dos demais. Em seguida, emprega-se o diagrama Q ($Wo+En+Fs$) - Jd (jadeíta) - Ae (aegirina). No caso dos piroxênios plotarem no campo Quad, utiliza-se o diagrama $Wo-En-Fs$, para classificar os termos ricos em Ca-Mg-Fe.

A individualização em dois tipos de clinopiroxênios das rochas alcalinas é bem clara nos diagramas. Utilizando os parâmetros Q ($Ca+Mg+Fe^{+2}$) vs. J (2Na) (Fig. 3a), obteve-se um grupo rico no componente Quad e o outro com valores intermediários de Ca-Na. No diagrama Q ($Wo+En+Fs$) - Jd (jadeíta) - Ae (aegirina), os clinopiroxênios Ca-Na plotam no campo da aegirina-augita (Fig. 3b). No diagrama $Wo-En-Fs$, os clinopiroxênios do tipo Quad classificam-se como hedenbergita de composição média $En_{14}Fs_{36}Wo_{50}$ (Fig. 3c).

Plagioclásio Em geral, a composição do plagioclásio é semelhante, mas há ligeiras diferenças no teor de anortita de acordo com a paragênese máfica da rocha, a exemplo dos clinopiroxênios. O plagioclásio do tipo 1 somente foi analisado em rochas sem granada por métodos visuais e forneceram teores de An de 4 a 7%.

O plagioclásio do tipo 2 (Tabela 2), quando associados com hedenbergita e titanita, é albita (An_0), mas passa a $An_{1,9}$ na presença de granada (Fig. 4).

Granada A granada dos plútons estudados ocorre sob duas formas texturais: (i) cristais anédricos, amarelo citrino, com texturas intersticiais ou esqueléticas, evidenciando uma cristalização tardia; e (ii) cristais euédricos a subédricos, amarelo claros, associados à cristais de hedenbergita com texturas indicativas de cristalização a partir deste. Composicionalmente são granadas ricas na molécula de andradita (82-95%), subordinadamente grossularita (1-6%), espessartita (3-7%) e almandina (1-7%), e de composição média $And_{89}Gro_4Esp_3Alm_4$ (Tabela 3).

O mineral é interpretado como produto da desestabilização de clinopiroxênio em meio oxidante (hedenbergita + O_2 « andradita + magnetita + quartzo). Com isso, infere-se que a geração da andradita resulta do reequilíbrio do magma alcalino sob condições particulares de fugacidade de oxigênio, o que explica as paragêneses das amostras com e sem granada. O balanço químico de elementos como Al_2O_3 , CaO, Na_2O e TiO_2 envolve associações das fácies sem granada (aegirina-augita + titanita + plagioclásio An_0) e com granada (hedenbergita + titanita + andradita + plagioclásio $An_{1,9}$). Análises em titanita (Tabela 4) indicam modificação química nesse mineral, mais rica em Al_2O_3 , CaO e Na_2O e mais pobre em TiO_2 quando em rochas sem granada, em confronto com a titanita da associação com granada. O balanço geoquímico desses elementos nesta associação se dá com a formação de hedenbergita, andradita (Al_2O_3 , CaO e TiO_2) e plagioclásio ligeiramente mais cálcico ($An_{1,9}$) nas rochas sem granada. Com base nesse dados, acredita-se que não somente a introdução de fluidos metassomáticos ricos em Ca justificaria as paragêneses das rochas alcalinas estudadas (Nascimento *et al.* 1998), mas sendo mais adequado considerar as condições particulares de alta fugacidade de oxigênio dos magmas alcalinos como fator controlador das associações minerais (Nascimento *et al.* 2000).

Óxidos O estudo detalhado dos aspectos texturais e composição química desses minerais (Tabela 5) revelam a presença de cristais com seção quadrada precoces de magnetita. Esses ocorrem inclusos em clinopiroxênio, ou como cristais maiores, dispersos na matriz da rocha. Apresentam baixos conteúdos de TiO_2 (<0,04%) e MnO (<0,7%). A presença de magnetita primária e precoce nessas rochas é sugestiva de condições relativamente oxidantes, já no início da cristalização.

CARACTERIZAÇÃO LITOGEOQUÍMICA Técnicas Analíticas Efetuou-se a análise química de 29 amostras representativas dos corpos alcalinos do MSJC. As proporções médias de elementos maiores e traços encontram-se na Tabela 6. O ferro total é reportado como Fe_2O_3 . Os dados analíticos de elementos maiores e menores foram determinados por fluorescência de raios-X no *Laboratoire de Pétrologie et Tectonique* da Universidade Claude Bernard I (Lyon, França), bem como no *Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques* - CRPG/CNRS (Vandœuvre, França); Os elementos traços e os terras raras foram obtidos por

Tabela 1 – Médias de análises químicas representativas de clinopiroxênio das rochas alcalinas do MSJC, com fórmulas estruturais calculadas para 6 oxigênios.

Elementos	Clinopiroxênio									
	Plúton Caxexa						Plúton Serra do Algodão			
	MA-18 (com granada, n = 6)		MA-66 (com granada, n = 11)		MA-21 (sem granada, n = 8)		RN-45A' (com granada, n = 2)		RN-45A (sem granada, n = 5)	
	média	σ	média	σ	média	σ	média	σ	média	σ
SiO ₂	48,71	0,33	49,38	0,28	50,62	0,50	49,61	0,16	50,02	0,27
TiO ₂	0,03	0,02	0,03	0,02	0,06	0,04	0,05	0,01	0,06	0,04
Al ₂ O ₃	1,08	0,11	0,93	0,13	0,63	0,06	1,36	0,05	0,60	0,01
FeOt	22,89	1,04	23,59	1,03	25,69	0,96	21,81	0,93	24,77	0,25
MnO	0,97	0,07	1,06	0,05	1,12	0,07	1,51	0,04	1,48	0,03
MgO	3,54	0,45	3,76	0,59	2,27	0,51	4,32	0,55	2,49	0,11
CaO	19,66	0,25	19,93	0,47	13,37	0,33	20,00	0,22	14,36	0,13
Na ₂ O	1,65	0,05	1,82	0,13	5,66	0,19	1,51	0,05	4,24	0,07
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	98,54	0,68	100,56	0,42	99,53	0,45	100,15	0,06	98,03	0,31
Si	1,966	0,011	1,953	0,010	1,972	0,010	1,964	0,003	2,013	0,010
Al ^{IV}	0,034	0,010	0,047	0,010	0,024	0,005	0,036	0,003	0,000	0,000
Fe ⁺³	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
T = 2,0	2,000	0,000	2,000	0,000	2,000	0,000	2,000	0,000	2,013	0,010
Al ^{VI}	0,017	0,006	0,003	0,003	0,005	0,005	0,028	0,006	0,029	0,001
Fe ⁺³	0,144	0,019	0,188	0,020	0,453	0,034	0,122	0,004	0,270	0,016
Ti	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,213	0,027	0,221	0,033	0,132	0,030	0,255	0,031	0,150	0,007
Fe ⁺²	0,613	0,020	0,573	0,032	0,380	0,034	0,581	0,031	0,533	0,015
Mn	0,012	0,007	0,011	0,007	0,025	0,011	0,015	0,002	0,017	0,010
M ₁ =1,00	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
Fe ⁺²	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002
Mn	0,022	0,007	0,025	0,007	0,012	0,011	0,036	0,001	0,033	0,009
Ca	0,850	0,010	0,845	0,019	0,558	0,011	0,848	0,005	0,620	0,004
Na	0,129	0,004	0,140	0,010	0,428	0,015	0,116	0,004	0,331	0,005
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
M ₂ =1,00	1,001	0,001	1,009	0,009	1,004	0,004	1,000	0,000	0,986	0,009
Total	4,000	0,000	4,009	0,009	4,004	0,005	4,000	0,000	3,998	0,003
Fe/(Fe+Mg)	0,87	0,02	0,86	0,02	0,92	0,02	0,84	0,03	0,91	0,00

Figura 3 - Diagramas aplicados aos clinopiroxênios segundo Morimoto (1988). (a) Q (Ca+Mg+Fe⁺²) vs. J (2Na), separando dois grupos diferentes. (b) Quad-Jadeíta (Jd)-Aegirina (Ae) classificando os clinopiroxênios não associados a rochas com granada como do tipo aegirina-augita. (c) Diagrama Wolastonita (Ca)-Enstatita (Mg)-Ferrosilita (Fe) classificando os clinopiroxênios associados a rochas com granada como do tipo hedenbergita.

Tabela 2 - Médias de análises químicas representativas de plagioclásio do tipo 2 das rochas alcalinas do MSJC, com fórmulas estruturais calculadas para 8 oxigênios.

Elementos	Plagioclásio											
	Plúton Caxexa						Plúton Serra do Algodão				Plúton Serra do Boqueirão	
	MA-18 (com granada, n = 6)		MA-66 (com granada, n = 6)		MA-21 (sem granada, n = 5)		RN-45A' (com granada, n = 6)		RN-45A (sem granada, n = 7)		RN-03A (com granada, n = 7)	
	média	σ	média	σ	média	σ	média	σ	média	σ	média	σ
SiO ₂	67,34	0,77	68,96	0,34	68,81	0,20	67,02	0,81	68,61	0,23	68,18	0,46
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Al ₂ O ₃	18,96	0,35	19,77	0,27	19,22	0,14	20,18	0,57	18,83	0,03	19,85	0,19
FeOt	0,17	0,05	0,11	0,05	0,30	0,04	0,14	0,06	0,46	0,11	0,12	0,04
MnO	0,00	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,25	0,04	0,13	0,06	0,01	0,01	1,18	0,44	0,03	0,01	0,62	0,17
Na ₂ O	10,16	0,22	11,61	0,03	11,91	0,11	9,87	0,34	10,52	0,03	10,14	0,14
K ₂ O	0,18	0,03	0,06	0,02	0,33	0,30	0,17	0,03	0,23	0,04	0,18	0,04
Total	97,05	1,30	100,69	0,53	100,61	0,34	98,75	0,63	98,70	0,21	99,15	0,57
Si	3,032	0,031	2,995	0,008	2,984	0,017	2,965	0,026	3,030	0,003	2,993	0,009
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al ^{IV}	1,002	0,006	1,012	0,009	0,983	0,007	1,052	0,029	0,980	0,003	1,029	0,010
Fe ⁺²	0,007	0,002	0,004	0,002	0,011	0,001	0,005	0,002	0,015	0,002	0,005	0,001
Mn	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,012	0,002	0,006	0,003	0,000	0,000	0,056	0,021	0,001	0,001	0,029	0,008
Na	0,883	0,008	0,978	0,005	1,002	0,007	0,847	0,027	0,900	0,004	0,864	0,009
K	0,010	0,002	0,004	0,001	0,018	0,017	0,010	0,002	0,013	0,002	0,010	0,002
Total	4,945	0,035	5,000	0,001	5,000	0,000	4,939	0,003	4,937	0,005	4,931	0,004
Ab	98	1	99	0	98	2	93	2	98	0	96	1
An	2	1	1	0	0	0	6	2	0	0	3	1
Or	1	0	0	0	2	1	1	1	2	0	1	0

Figura 4 - (a) Diagrama Ortoclásio-Albita-Anortita de plagioclásio das rochas alcalinas.

espectrometria de plasma de fonte gasosa (ICP-MS) no CRPG/CNRS. A precisão analítica para os elementos maiores é inferior a 2%, podendo alcançar 10% para aqueles de baixas abundâncias (MnO, MgO, P₂O₅). Para os elementos traços, a precisão é superior a 5%, chegando a 10% para os elementos com concentrações

menores que 30 ppm.

Geoquímica Os granitóides alcalinos apresentam ampla variação de conteúdos de SiO₂ (69-77%), podendo ser considerados como de alta sílica, que são de difícil enquadramento com respeito à sua filiação magmática. Apenas a integração de dados geológicos, petrográficos e geoquímicos permite elucidar a série magmática a que pertencem os líquidos muito diferenciados (Collins *et al.* 1982, Whalen *et al.* 1987, Sylvester 1989, Eby 1990, Nardi 1991). Essas rochas também são ricas em álcalis (Na₂O+K₂O = 8-12%) e um pobres em CaO (0,2-1,2%) e MgO (<0,1%).

Diagramas discriminantes com elementos maiores mostram que estas rochas têm afinidade alcalina, como mostram as figuras 5a e Fig. 5b. No diagrama da figura Fig. 5c, as amostras posicionam-se claramente na porção mais diferenciada de séries alcalinas. A afinidade alcalina desse magmatismo é realçada por altas concentrações de álcalis (cerca de 10% de Na₂O+K₂O para uma média de 73% SiO₂; Fig. 5c e Tabela 6), elevados valores de #Fe e alto índice agpático (Tabela 6). Isto permite caracterizar o plutonismo em foco como da associação alcalina metaluminosa (*sensu* Nardi (1991). Composições normativas dos granitóides mostram que estes são transicionais de metaluminosos a peraluminosos, com razões moleculares A/NK entre 1,0 e 1,19 e A/CNK entre 0,93 e 1,09 (Maniár & Piccoli 1989) (Tabela 6). O caráter peraluminoso é mais ditado pela deficiência em CaO, relativo aos altos valores de Na₂O+K₂O, do que por excesso em alumina.

Tabela 3 - Médias de análises químicas representativas de granada das rochas alcalinas do MSJC, com fórmulas estruturais calculadas para 24 oxigênios.

Elementos	Granada							
	Plúton Caxexa				Plúton Serra do Algodão		Plúton Serra do Boqueirão	
	MA-18 (n = 2)		MA-66 (n = 6)		RN-45A' (n = 4)		RN-44D (n = 5)	
	média	σ	média	σ	média	σ	média	σ
SiO ₂	40,36	4,94	35,49	0,17	35,53	0,06	35,49	0,18
TiO ₂	0,21	0,12	0,46	0,45	0,66	0,03	0,49	0,08
Al ₂ O ₃	1,77	0,54	2,93	0,66	3,29	0,10	2,81	0,15
FeOt	25,93	2,70	25,79	1,65	28,51	0,17	28,99	0,26
MnO	1,17	0,06	1,16	0,40	2,07	0,21	2,69	0,07
MgO	1,78	1,75	0,03	0,03	0,09	0,01	0,07	0,02
CaO	27,91	2,99	31,71	0,85	29,27	0,31	29,08	0,44
Na ₂ O	0,45	0,45	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	99,56	0,73	97,62	0,15	99,40	0,20	99,61	0,46
Si	6,512	0,545	5,918	0,046	5,984	0,008	5,987	0,033
Ti	0,026	0,015	0,057	0,050	0,083	0,004	0,062	0,010
AlT	0,342	0,117	0,572	0,130	0,653	0,020	0,558	0,032
Cr	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001
Fe ⁺³	3,172	0,332	3,484	0,210	3,256	0,025	3,365	0,042
Fe ⁺²	0,141	0,141	0,115	0,078	0,398	0,020	0,336	0,035
Mn	0,161	0,015	0,164	0,057	0,296	0,030	0,384	0,011
Mg	0,413	0,407	0,008	0,007	0,022	0,002	0,018	0,004
Ca	4,869	0,709	5,664	0,126	5,282	0,048	5,256	0,069
Na	0,135	0,135	0,011	0,011	0,000	0,000	0,002	0,002
Total	15,768	0,241	15,999	0,002	15,977	0,009	15,892	0,127
Gro	2,17	2,17	5,73	5,15	4,53	0,27	1,46	0,47
Alm	2,34	2,34	1,92	1,31	6,68	0,33	5,63	0,61
Pir	7,87	7,77	0,13	0,13	0,36	0,04	0,30	0,07
Esp	2,85	0,06	2,75	0,94	4,98	0,51	6,43	0,24
And	84,77	3,20	87,72	5,99	83,38	0,47	86,15	0,98
Uva	0,01	0,01	0,08	0,08	0,08	0,06	0,03	0,02

A caracterização da afinidade alcalina desses granitóides não é coerente com suas concentrações em Nb, Ga, Y e Zr (Tabela 6), sempre abaixo da média dos granitos alcalinos clássicos (Whalen *et al.* 1987; Eby 1990). Todavia, Nardi (1991) mostra que granitos metaluminosos de associações alcalinas usualmente não apresentam elevados teores em elementos de alto potencial iônico, o que é o caso ora apresentado. Outro fator ímpar se refere aos elevados valores em Sr e muito baixos em Rb (Tabela 6) se comparados aos magmas alcalinos clássicos.

Elementos Terras Raras Dados de 14 análises de ETR encontra-se na Tabela 6. Os respectivos padrões normalizados com respeito ao condrito C1 de Evensen *et al.* (1978) estão na figura 6. Os padrões são subparalelos entre si, sugerindo que as amostras analisadas são cogenéticas, e possuem geometria côncava e forte anomalia positiva de Eu ($Eu/Eu^* = 1,5-2,9$). Devido a forma dos padrões de ETR, a razão $(La/Yb)_N$ não os descreve corretamente, por isso optou-se por utilizar as razões $(La/Sm)_N$ e $(Gd/Yb)_N$ para indicar o fracionamento dos ETR (Tabela 6). Observou-se maior fracionamento de ETRL ($La_N/Sm_N = 2-8$) do que ETRP ($Gd_N/Yb_N = 1-2$). Os baixos conteúdos de ETR ($\Sigma ETR < 121 ppm$) e a anomalia positiva de Eu com os de granitos alcalinos clássicos.

EVOLUÇÃO PETROLÓGICA Dentre os granitóides alcalinos estudados, foi escolhido o Plúton Caxexa para a caracterização

petrológica, por apresentar melhores resultados analíticos e ser o corpo melhor estudado até o momento (Nascimento *et al.* 1997; Nascimento 2000; Nascimento *et al.* 2000)

Utilizando SiO₂ como índice de diferenciação, os diagramas de Harker revelam comportamento regular de alguns elementos maiores e traços (Fig. 7). Na₂O foi o único que mostrou dispersão, enquanto os demais óxidos apresentam uma nítida tendência de empobrecimento com o aumento de SiO₂. A correlação negativa também se verifica com Sr, em contraste com o Rb, mais incompatível. No diagrama Rb vs Sr, os dados dispõem-se segundo uma reta vertical (Fig. 7), o que sugere que a cristalização fracionada foi o mecanismo petrogenético mais provável, como demonstram Cocherie (1986) e Martin (1987). A mistura entre magmas pode ser descartada, já que seria produzida uma curva convexa, em oposição à de fusão parcial (Cocherie 1986). Apoiado na hipótese de cristalização fracionada, as linhas de tendência da figura 7 explicam o fracionamento de minerais ricos em CaO e Sr e ligeiramente ricos em Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O.

A hipótese de cristalização fracionada foi testada por meio do balanço de massa de óxidos e utilizando-se o programa XLFRAC (Stormer Jr. & Nicholls 1978). Para a execução do mesmo, foram empregadas as análises químicas dos minerais dos granitóides estudados bem como dados da literatura (Deer *et al.* 1996). Amstras do Plúton Caxexa foram selecionadas, onde escolheu-se o líquido menos diferenciado, chamado L₀ (MA-08A), e o mais evo-

Tabela 4 - Médias de análises químicas representativas de titanita das rochas alcalinas do MSJC, com fórmulas estruturais calculadas para 20 oxigênios.

Elementos	Titanita			
	Plúton Caxexa		MA-21	
	M A-66 (com granada, n = 3)	σ	(sem granada, n = 2)	σ
SiO ₂	29,91	0,16	30,25	0,01
TiO ₂	35,78	0,10	33,17	0,21
Al ₂ O ₃	1,34	0,28	1,73	0,15
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO ⁺	2,00	0,25	3,96	0,41
MnO	0,08	0,03	0,10	0,04
MgO	0,00	0,00	0,04	0,00
CaO	26,72	0,18	28,80	1,16
Na ₂ O	0,08	0,04	0,17	0,01
K ₂ O	0,01	0,01	0,09	0,09
Total	95,96	0,50	96,80	0,72
Si	4,037	0,029	4,018	0,034
Ti	3,631	0,022	3,314	0,050
Al ⁺	0,213	0,044	0,268	0,020
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ⁺³	0,120	0,024	0,400	0,064
Y = 4,00	3,964	0,029	3,982	0,034
Fe ⁺²	0,105	0,008	0,040	0,024
Mn	0,009	0,004	0,012	0,004
Mg	0,000	0,000	0,006	0,002
Ca	3,863	0,008	3,882	0,014
Na	0,021	0,008	0,044	0,004
K	0,001	0,002	0,016	0,016
X = 4,00	4,000	0,003	4,000	0,000
Total	12,001	0,004	12,000	0,000

Tabela 5 - Médias de análises químicas representativas de óxidos das rochas alcalinas do MSJC, com fórmulas estruturais calculadas para 32 oxigênios.

Elementos	Óxido											
	Plúton Caxexa				Plúton Serra do Algodão				Plúton Serra do Boqueirão			
	MA-18 (com granada, n = 2)	σ	MA-66 (com granada, n = 2)	σ	MA-21 (sem granada, n = 5)	σ	MA-21 (sem granada, n = 5)	σ	MA-21 (sem granada, n = 5)	σ	MA-21 (sem granada, n = 5)	σ
SiO ₂	0,00	0,00	0,04	0,01	0,56	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TiO ₂	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,15	0,10	0,10	0,10
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,02	0,02	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO ⁺	92,68	0,34	92,95	0,38	91,61	2,72	91,99	0,42	93,17	0,25	93,17	0,25
MnO	0,16	0,05	0,04	0,03	0,26	0,11	0,04	0,00	0,47	0,24	0,47	0,24
MgO	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
CaO	0,00	0,00	0,12	0,12	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,00	0,00	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,01	0,01	0,14	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	98,80	0,48	93,30	0,39	92,74	1,95	92,08	0,42	93,81	0,30	93,81	0,30
Si	0,000	0,000	0,014	0,003	0,178	0,173	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ti	0,008	0,001	0,011	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,034	0,024	0,034	0,024
Al ⁺	0,000	0,000	0,011	0,008	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Fe ⁺³	15,986	0,004	15,976	0,057	15,663	0,527	15,985	0,009	15,931	0,050	15,931	0,050
Fe ⁺²	7,948	0,004	7,907	0,100	7,976	0,276	7,990	0,010	7,905	0,043	7,905	0,043
Mn	0,041	0,013	0,010	0,010	0,069	0,029	0,008	0,001	0,124	0,064	0,124	0,064
Mg	0,019	0,008	0,005	0,005	0,020	0,018	0,007	0,007	0,006	0,005	0,006	0,005
Ca	0,000	0,000	0,040	0,040	0,012	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Na	0,000	0,000	0,029	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,003	0,003	0,053	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	24,002	0,002	24,008	0,007	24,000	0,001	24,001	0,000	24,001	0,000	24,001	0,000

Tabela 6 - Composição média em elementos maiores, traços e terras raras de amostras representativas dos granitóides alcalinos. Legenda: PF = perda ao fogo. tr = traço. NA = não analisado. A/CNK = razão molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$. IAG = índice agpaítico = $[(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3]$ em moles. $100Fe\# = \text{número de ferro} = 100 FeO_i \text{ mol} / (FeO_i \text{ mol} + MgO \text{ mol})$. $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)$. n = número de amostras. σ = desvio padrão.

	Plúton Caxexa (n = 14)		Plúton Serra do Boqueirão (n = 8)		Plúton Serra do Algodão (n = 7)	
Amostra	média	σ	média	σ	média	σ
SiO ₂	72,45	1,28	72,56	2,05	71,02	1,23
TiO ₂	0,06	0,02	0,06	0,01	0,08	0,05
Al ₂ O ₃	14,87	0,50	14,99	1,10	15,18	0,51
Fe ₂ O _{3t}	1,04	0,15	0,38	0,11	0,51	0,18
MnO	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
MgO	0,06	0,03	0,07	0,06	0,12	0,12
CaO	0,55	0,19	0,33	0,14	0,55	0,32
Na ₂ O	5,38	0,30	4,75	0,76	4,55	0,85
K ₂ O	4,79	0,41	5,54	0,95	6,19	1,13
P ₂ O ₅	0,04	0,03	0,04	0,02	0,06	0,03
PF	0,34	0,23	0,08	0,06	0,03	0,03
Total	99,57	0,43	99,52	0,39	99,29	0,26
Ba (ppm)	1996	590	3216	655	3084	807
Ga	16	6	8	6	21	1
Nb	11	4	11	4	16	6
Rb	140	14	138	45	133	26
Sr	890	246	1100	399	1050	268
V	24	6	22	9	4	2
Y	12	2	8	3	6	2
Zr	111	33	67	62	135	75
Na ₂ O+K ₂ O	10,16	0,52	10,28	0,75	10,74	0,41
A/NK	1,06	0,03	1,09	0,05	1,07	0,05
A/CNK	0,99	0,03	1,04	0,03	1,00	0,04
IAG (NK/Al)	0,94	0,03	0,92	0,04	0,94	0,04
100Fe#	94	2	83	12	82	9
La (ppm)	15,45	10,68	8,22	3,48	12,00	4,96
Ce	23,61	14,05	15,11	5,47	19,69	8,38
Pr	2,72	1,92	1,81	0,54	2,13	0,83
Nd	8,85	5,86	6,49	1,71	7,51	2,79
Sm	1,60	0,89	1,36	0,30	1,32	0,48
Eu	0,86	0,40	0,88	0,05	0,93	0,24
Gd	1,47	0,76	0,98	0,25	1,13	0,35
Tb	0,24	0,12	0,18	0,04	0,16	0,05
Dy	1,48	0,68	1,05	0,32	0,92	0,28
Ho	0,33	0,14	0,20	0,08	0,18	0,07
Er	0,92	0,40	0,56	0,21	0,51	0,19
Tm	0,16	0,07	0,10	0,04	0,08	0,03
Yb	1,09	0,46	0,73	0,36	0,59	0,19
Lu	0,17	0,07	0,13	0,04	0,09	0,03
ΣREE	67,37	29,98	37,79	12,73	47,23	18,71
(La/Sm) _N	5,77	1,38	3,69	1,14	5,63	0,80
(Gd/Yb) _N	1,10	0,32	1,24	0,40	1,58	0,20
Eu/Eu*	1,74	0,22	2,31	0,36	2,35	0,33

Figura 5 – Diagramas usados na definição de séries magmáticas. (a) R1-R2 (De La Roche et al. 1980); (b) Wright (1969); e (c) álcalis total vs. sílica (Lameyre 1987), mostrando a divisória subalcalina/alcalina (curva tracejada) e as linhagens alcalina (alc), monzonítica (mz) e granodiorítica (gd).

luído, ou L_1 (MA-99), com as duas recalculadas a 100% em base anidra. De acordo com dados petrográficos, foram realizadas inúmeras combinações de minerais fracionados.

Com base nas informações acima, obteve-se um cumulado formado por plagioclásio (An_{20} ; 88,11%), clinopiroxênio (9,26%) e magnetita (2,63%), com taxa de cristalização de 10% e Sr^2 de 0,89 (Tabela 7). Outros testes foram realizados empregando diferente minerais, optando-se também por hornblenda, biotita, granada e ortoclásio juntos, separados ou mesmo em diversas combinações, resultando em grandes erros estatísticos ($Sr^2 > 45$) ou taxas de cristalização negativas (sem significado). Dados de campo não apresentam evidências claras de cumulos possuindo os minerais sugeridos pelo modelamento. Todavia, são encontrados relíquias de acamamento magmático com bandas de espessura centimétrica, com predomínio de clinopiroxênio e feldspatos que podem representar cumulos. Da mesma forma, são identificadas inclusões de clinopiroxênio e plagioclásio (em parte carbonatizados), encontrados no interior de fenocristais de microclina.

Entende-se que qualquer modelo petrogenético de balanço de massa também deve ser válido para os elementos traços, assim o cumulado acima obtido foi testado com respeito aos ETR. Neste caso, aplicou-se a equação de cristalização fracionada segundo Rayleigh (1896) e os coeficientes de partição sugeridos por Martin (1987). Considerando o cumulado apresentado (Tabela 7), obteve-se um excelente ajuste entre o espectro esperado (L_1) e o teórico (L_1), todavia com Yb_N bem maior que L_1 . Um acréscimo de uma pequena quantidade de zircão no cumulado proporcionou um ajuste melhor entre os padrões de ETR de L_1 e L_1 (Figura 8). Deste modo, os modelos de balanço de massa e ETR e composições de outros elementos traços (Ba, Sr, Zr) são consistentes com a hipótese de cristalização fracionada.

A evolução desses granitóides se deu, então, por meio de fracionamento de minerais anidros. Isto poderia, a primeira vista, implicar na inexistência ou extrema escassez em água do magma inicial. Uma fase fluida poderia ter existido no magma alcalino, mas que não deve ter proporcionado pressões suficientes para a formação de minerais hidratados. A fugacidade de oxigênio parece ter sido o fator primordial no controle de algumas fases minerais, refletindo na quantidade de magnetita primária e na transformação de hedenbergita em andradita.

DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS Características comuns para os corpos granitóides alcalinos no MSJC, são sumarizadas como: (i) grande similaridade petrográfica e textural; representada principalmente por álcali-feldspato granitos; (ii) semelhança química entre os principais minerais analisados; (iii) composições modais e químicas bastante evoluídas, com minerais félsicos (feldspatos, quartzo) > 90% em volume, e altos valores de sílica e total de álcalis; (iv) afinidade alcalina com base nas relações de sílica vs. álcalis, no entanto com feições transicionais entre tipos metaluminosos e fracamente peraluminosos; e (v) teores em Nb, Ga, Sr, Zr, Rb, SETR e anomalias de Eu distintas com respeito às associações alcalinas clássicas.

A química mineral mostra que o clinopiroxênio dos granitóides podem ser individualizados em dois tipos diferentes, onde nas rochas que contêm granada, o clinopiroxênio é mais cálcico, classificado como hedenbergita, já na ausência da granada, o clinopiroxênio é aegirina-augita. Da mesma forma, é possível separar dois tipos de plagioclásios com composição química ligeiramente distintas, os mais enriquecidos em CaO correspondendo a rochas com granada. Aqueles com teor de anortita zero ocorrem

Figura 6 - Padrões de elementos terras raras de amostras selecionadas dos granitóides alcalinos, normalizados segundo o condrito C1 de Evensen et al. (1978).

em rochas que não contêm granada. A composição dessas granadas mostra um enriquecimento na molécula de andradita, com baixa quantidade de Al_2O_3 e TiO_2 .

A maior quantidade de CaO nesses minerais quando associados a granada não é refletida na composição química da rocha total (Nascimento 2000), já que a comparação de análises químicas em rocha com ou sem granada não mostra diferenças significativas entre uma fácies ou outra, com relação ao CaO, Fe_2O_3 e TiO_2 . Sendo assim, deduz-se que a formação da granada está relacionada a um reequilíbrio químico do magma alcalino, refletido na química dos minerais e não na composição química da rocha como um todo. Isso pode ser observado na composição química de titanitas. A titanita quando presente em rochas sem granada é mais rica em Al_2O_3 , CaO e Na_2O e mais pobre em TiO_2 , em contraste com a titanita associada com granada. Assim, o balanço geoquímico dos elementos citados ocorre pela formação de clinopiroxênio cálcico (hedenbergita), andradita (Al_2O_3 , CaO e TiO_2) e plagioclásio ligeiramente mais cálcico (An_{1-2}) nas rochas sem granada.

No geral, parte destas características são semelhantes às descritas por Nardi (1991) em associação alcalina supersaturada em sílica, metaluminosa a peraluminosa. Aspectos discordantes são a presença de biotita e anfibólio ricos em Fe, elevados Nb e Rb, baixo Sr, e anomalia negativa de Eu nos tipos referidos por Nardi (1991). Condições oxidantes durante a diferenciação magmática são atestadas por cristalização precoce de magnetita, associação quartzo + titanita + magnetita (Wones 1989) e transformação tardia de clinopiroxênio em granada + óxido de ferro.

Por fim, percebe-se que pode haver uma relação entre as estruturas regionais distensionais que controlaram o alojamento desses granitóides e sua geoquímica particular (Jardim de Sá 1994, Jardim de Sá et al. 1999). Neste sentido, reativação de zonas de cisalhamento enraizadas na base da crosta ou mesmo no manto litosférico, em regime distensional, tanto em cinturões orogênicos recém estabilizados como em regimes de afinamento crustal são relacionados ao magmatismo alcalino supersaturado em sílica (Black et al. 1985), e não fogem do contexto regional de colocação dos granitóides alcalinos estudados.

Agradecimentos Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Figura 7 - Diagramas de Harker e a relação entre elemento compatível (Sr) e incompatível (Rb). CF = cristalização fracionada e FP = fusão parcial.

Figura 8 - Modelamento de cristalização fracionada do Plúton Caxexa, normalizado segundo Evensen et al. (1978).

Tabela 7 - Resultados obtidos no modelamento de cristalização fracionada do Plúton Caxexa.

	L ₀ (MA-08A) (An ₃₀)	L ₁ (MA-99)	L ₁ '(*)	Δ(L ₁ -L ₁ ')	cumulad o
SiO ₂	71,72	73,51	73,12	0,39	60,34
Al ₂ O ₃	15,39	14,93	14,82	0,11	20,26
Fe ₂ O _{3t}	1,06	0,88	0,62	0,26	5,04
MgO	0,05	0,04	0,02	-0,02	0,34
CaO	0,75	0,23	0,20	0,03	5,43
Na ₂ O	5,88	5,58	5,62	-0,04	8,01
K ₂ O	5,08	4,71	5,52	-0,81	0,57
TiO ₂	0,04	0,05	0,04	0,01	0,01
P ₂ O ₅	0,03	0,07	0,04	0,03	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	-	100,00

Referências

- Afiffe A.M. & Essene E.J. 1988. MINFILE – A microcomputer program for storage and manipulation of chemical data on minerals. *Amer. Mineral.*, **73**:446-448.
- Almeida F.F.M., Leonards JR., O.H., Valença J. 1967. Review on granitic rocks of northeast South America. IUGS/UNESCO. Symp., Recife, 41p.
- Aoki K. 1964. Clinopyroxenes from alkaline rocks of Japan. *Amer. Mineral.*, **49**:1199-1223.
- Araújo J.M.M., Trindade R.I., Galindo A.C., Souza Z.S., Jardim de Sá E.F. 1993. Características petrográficas preliminares do granito Serra do Algodão (Barra de Santa Rosa - PB): um plutão alcalino na região do Seridó. In: SBG, Simp. Geol. NE, 15, Natal, *Boletim* 13, p.101-103.
- Black R., Lameyre J., Bonin B. 1985. The structural setting of alkaline complexes. *J. Afr. Earth Sci.*, **3**:5-16.
- Bonin B. & Giret A. 1984. Clinopyroxene compositional trends in over-saturated and undersaturated alkaline ring complexes. *J. Afr. Earth. Sci.*, **3**:175-183.

L₀ = líquido inicial; L₁ = líquido final; L₁'(*) = líquido produzido a partir da extração do cumulado (em peso) formado por Plagioclásio (An₂₀) 88,11%; Clinopiroxênio 9,26% e Magnetita 2,63%. Grau de cristalização fracionada de 10% (em peso) e erro estatístico (Σr²) de 0,89, representando a soma dos quadrados dos desvios sobre cada óxido.

- Cocherie A. 1986. Systematic use of trace element distribution patterns in log-log diagrams for plutonic suites. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **50**:2517-2522.
- Collins W.J., Beams S.D., White A.J., Chappel B.W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **80**:189-200.
- Dantas E.L. 1997. *Geocronologia U-Pb e Sm-Nd de terrenos arqueanos e paleoproterozóicos do Maciço Caldas Brandão, NE do Brasil*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 206 p.
- Dantas E.L., Hackspacher P.C., Van Schmus W.R., Brito Neves B.B. 1998. Archean accretion in the São José do Campestre Massif,

- Borborema Province, northeast Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **28**:221-228.
- De La Roche H., Leterrier J., Granclaude P., Marchal M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses. Its relationship with current nomenclature. *Chem. Geol.*, **29**:183-210.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1996. *An Introduction to the Rock-forming Minerals*. Longman, 2ª Edição, London. 696 pp.
- Eby G.N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, **26**:115-134.
- Evensen N.H., Hamilton P.J., O'Nions R.K. 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**:1199-1212.
- Hollanda M.H.B.M. 1998. *Mecanismos de alojamentos de magmas granitóides: exemplo do Plúton de Japi (RN)*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 126 p.
- Hollanda M.H.B.M., Galindo A.C., Jardim de Sá E.F. 1995. O fácies petrográfico do Plúton de Japi (RN). In: SBG, Simp. Geol. NE, 16, Recife, *Boletim* 14, p.319-323.
- Jardim de Sá E.F. 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 803 p.
- Jardim de Sá E.F., Trindade R.I.F., Hollanda M.H.B.M., Araújo J.M.M., Galindo A.C., Amaro V.E., Souza Z.S., Vigneress J.L., Lardeaux J.M. 1999. Brasiliano syntectonic alkaline granites emplaced in a strike slip/extensional setting (Eastern Seridó Belt, NE Brazil). *Anais Acad. Bras. Ciênc.* **71**:17-27.
- Lameyre J. & Bowden P. 1982. Plutonic rocks type series: discrimination of various granitoid series and related rocks. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **14**:169-186.
- Lameyre J. 1987. Granites and evolution of the crust. *Rev. Bras. Geoc.*, **17**:349-359.
- Maniar P.D. & Piccoli P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **101**:635-643.
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archean trondhjemites, tonalites and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry. *J. Petrol.*, **28**:921-953.
- Morimoto C.N. 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Amer. Mineral.* **73**:1123-1133.
- Nardi L.V.S. 1991. Caracterização petrográfica e geoquímica dos granitos metaluminosos da associação alcalina: revisão. *Pesquisas*, **18**:44-57.
- Nascimento M.A.L. 2000. *Petrologia do magmatismo tardi-brasiliano no Maciço São José de Campestre (RN-PB), com ênfase no plúton alcalino Caxexa*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 142 p.
- Nascimento M.A.L., Galindo A.C., Jardim de Sá E.F. 1997. Considerações preliminares sobre o Granitóide Caxexa: um plutonismo alcalino aluminoso sintectônico na Faixa Seridó. In: SBG, Simp. Geol. NE, 17, Fortaleza, *Boletim* 15, p. 293-296.
- Nascimento M.A.L., Nascimento R.S.C., Galindo A.C., Souza Z.S. 2000. Origem das granadas do tipo andradita em rochas alcalinas na porção sul do Maciço São José de Campestre (extremo NE da Província Borborema). In: SBG, Simp. Geol. do Nordeste, 18, Recife, *Boletim* 16, p. 103-103.
- Nascimento R.S.C. 1998. *Petrologia dos Granitóides Brasileiros associados à Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (PB)*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 133 p.
- Nascimento R.S.C., Galindo A.C., Jardim de Sá E.F., Lardeaux J.-M. 1997. Granitóides brasileiros associados à Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos: caracterização geoquímica preliminar. In: SBG, Simp. Geol. NE, 17, Fortaleza, *Boletim* 15, p. 288-292.
- Nascimento R.S.C., Sá J.M., Galindo A.C., McReath I., Nascimento M.A.L. 1998. Granitos neoproterozóicos alcalinos com andradita no extremo nordeste da Província Borborema. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, *Anais*, p. 513-513.
- Rayleigh J.W.S. 1896. Theoretical considerations respecting the separation of gases by diffusion and similar processes. *Philos. Mag.*, **42**:77-107.
- Sial A.N. & Ferreira V.P. 1988. Brasiliano age peralkaline rocks of the central structural domain, Northeast Brazil. *Rend. Soc. Ital. di Mineral. e Petrol.*, **43**:307-341.
- Sial A.N. 1987. Granitic rocks in northeast Brazil. In: Intern. Symp. Granites Assoc. Miner., 1st, Salvador, *Anais*, p. 61-69.
- Souza Z.S. & Jardim de Sá E.F. 1993. Metamorfismo de alta temperatura associado a uma estrutura transtraccional brasileira a SE de Barra de Santa Rôsa (PB). In: SBG, Simp. Geol. NE, 15, Natal, *Boletim* 13, p. 124-127.
- Souza Z.S., Martin H., Lardeaux J.-M. 1999. Formação de crosta continental juvenil no Arqueano e no Paleoproterozóico do Maciço São José de Campestre, NE da Província Borborema. In: SBG, Simp. Nac. Estud. Tect., 7, Lençóis, *Anais*, p. 18-20.
- Storner Jr. J.C. & Nicholls J. 1978. XLFRAC: a program for the interactive testing of magmatic differentiation models. *Computers & Geosci.*, **4**:143-159.
- Streckeisen A.L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. Rev.*, **12**:1-33.
- Sylvester P.J. 1989. Post-collisional alkaline granites. *J. Geol.*, **97**:180-261.
- Trindade R.I.F., Araújo J.M.M., Jardim de Sá E.F., Galindo A.C., Souza Z.S. 1995. Alojamento de granitóides no contexto da Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Faixa Seridó, NE do Brasil). In: SBG, Simp. Nac. Estud. Tect., 5, Gramado, *Anais*, p. 215-216.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappel B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **95**:407-419.
- Wones D.R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *Amer. Mineral.*, **74**:744-749.
- Wright J.B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geol. Magaz.*, **106**:370-384.

Manuscrito a-1376

Recebido em 27 de setembro de 2002

Revisão dos autores em 15 de abril de 2003

Revisão aceita em 24 de abril de 2003