

IDADE Pb-Pb E ASPECTOS PETROLÓGICOS DA MINERALIZAÇÃO EM SODALITA AZUL DO MACIÇO NEFELINA-SIENÍTICO ITARANTIM, SUL DO ESTADO DA BAHIA

MARIA DE LOURDES DA SILVA ROSA^{1,2}, HERBET CONCEIÇÃO^{2,3}, MOACIR JOSÉ BUENANO MACAMBIRA⁴, MOACYR MOURA MARINHO^{2,5}, MÔNICA PRISGSHEIM DA CUNHA^{2,3} & RITA CUNHA LEAL MENEZES^{2,3}

Abstract *Pb-Pb AGE AND PETROLOGICAL ASPECTS OF THE BLUE SODALITE MINERALIZATION OF THE ITARANTIM NEPHELINE-SYENITE MASSIF, SOUTHERN STATE OF BAHIA* The Itarantim nepheline-syenite massif (220 km²) is a late proterozoic intrusion (727±30 Ma; Rb-Sr) of the southern region of the State of Bahia. It is mostly constituted by nepheline-bearing syenites, with biotite or aegirine, and by alkaline dykes. The dykes are more abundant in the biotite-nepheline-syenites and are the most evolved rocks of the massif. Recently, a blue sodalite-syenite dyke has been identified in the southwest part of the massif, hosted by biotite-nepheline syenites. The blue syenites have been exploited as dimension stone. The dyke has magmatic sodalite that crystallized between 720 ± 9 Ma and 732 ± 24 Ma (Pb-Pb_{Zr}), and cuts the magmatic foliation of the host syenite, imprinting a metasomatism with sodalite formation. Petrographic data indicate that the magmatic sodalite formed during the late stages by a volatile rich magma (500–600° C). The high contents (ppm) of Zr (>5,000), Hf (141), Ta (169), U (74) and F (1200) of the blue syenite suggest that it represents a highly evolved product from differentiation of the nepheline-syenitic magma.

Keywords: Pb-Pb age, blue sodalite, Itarantim Nepheline-Syenitic Massif.

Resumo O Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim (220 km²) constitui uma intrusão brasileira (idade Rb-Sr de 727 ± 30 Ma) localizada no extremo sul do alinhamento de rochas alcalinas existente no sul do Estado da Bahia. Ele é constituído essencialmente por nefelina-sienitos com biotita ou egrina e por diques alcalinos, mais abundantes no biotita-nefelina-sienito. Estes diques constituem as rochas mais evoluídas deste maciço. Recentemente foi identificado um dique de sodalita-sienito de cor azul encaixado no biotita-nefelina-sienito, localizado na região sudoeste do maciço e que está sendo explorado como rocha ornamental. Este dique, portador de sodalita magmática e cuja idade de cristalização está compreendida entre 720 ± 9 Ma e 732 ± 24 Ma (Pb-Pb_{Zr}), trunca a foliação magmática do sienito encaixante e provoca formação de sodalita metassomática. Os dados petrográficos indicam que a sodalita magmática do dique forma-se no final da cristalização (500-600°C) de um magma particularmente rico em fluidos. Os elevados conteúdos em ppm de Zr (>5.000), Hf (141), Ta (169), U (74) e F (1200) obtidos para os sienitos azuis estudados sugerem que eles representem produtos fortemente evoluídos da diferenciação do magma nefelina-sienítico.

Palavras-chave: Idade Pb-Pb, sodalita azul, Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim.

INTRODUÇÃO Na região sul do Estado da Bahia tem-se explorado nos últimos 40 anos rochas sieníticas de cor azul, que no mercado de rochas ornamentais são nomeadas de “Azul-Bahia” ou “Granito-Azul”. A cor azul nestas rochas resulta da presença de sodalita, e um bloco desta rocha é comercializado na mina por US\$ 500/m³ (dólar americano), quanto o preço final do sienito azul pode chegar a US\$ 5.000/m³ (Spínola 2003).

Os sienitos azuis são esporádicos no interior dos maciços nefelina-sieníticos e constituem corpos irregulares e de pequenas dimensões (<3 km²). Atualmente as explorações mais importantes de sienitos azuis localizam-se nos maciços Itajú do Colônia, Potiraguá, Itarantim e no Complexo Alcalino Floresta Azul.

Os estudos desenvolvidos até agora (Fujimori, 1978, Cunha et al. 2002, Menezes et al. 2002) têm demonstrado que os sienitos azuis correspondem a uma fácies pegmatítica. Menezes et al. (2002) e Cunha et al. (2002) têm descrito, nos vários maciços por eles

estudados, que o aparecimento da sodalita se processa as custas de nefelina-sienitos e por ação de processo metassomático.

As idades K-Ar e Ar-Ar em minerais (Cordani et al. 1974, Bernat et al. 1977) e isócronas Rb-Sr, em rochas (Brito Neves et al. 1980, Martins & Santos 1993), de sítios mineralizados em sodalita azul têm revelado valores de 429 Ma até 732 Ma. Determinações geocronológicas recentes, efetuadas pelo método Pb-Pb por evaporação de monocristais de zircão, em rochas sieníticas de maciços que hospedam mineralizações em sodalita azul forneceram idades entre 688 e 739 Ma (Corrêa Gomes 2000, Rosa et al. 2002, 2003).

A presença de cristais de zircão nos sienitos azuis em uma mina em exploração no Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim fornece a primeira oportunidade de se datar esta mineralização utilizando-se do método Pb-Pb em zircão. Assim, os objetivos deste trabalho são os de apresentar a idade Pb-Pb por evaporação de

1 - Pesquisadora do CNPq – Desenvolvimento Científico Regional (DCR). (lourdes@cpgg.ufba.br)

2 - Laboratório de Petrologia aplicada à Pesquisa Mineral, Instituto de Geociências, UFBA. Rua Caetano Moura, 123, Federação, CEP: 40201-340, Salvador-BA (herbet@ufba.br, mpunha@ufba.br, menezesrita@hotmail.com)

3 - Curso de Pós-Graduação em Geologia – UFBA

4 - Centro de Geociências, UFPA. Caixa Postal 1611, CEP: 66075-900, Belém-PA (moamac@ufpa.br)

5 - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 4ª Avenida, 460, Centro Administrativo da Bahia, CEP: 41750-300, Salvador-BA (cbpmdt@cbpm.com.br)

monocristais de zircão e, associado a dados geológicos, petrográficos e litogeoquímicos igualmente obtidos, discutir a gênese dos sodalita-sienitos azuis deste sítio mineralizado.

PROVÍNCIA ALCALINA DO SUL DO ESTADO DA BAHIA

A Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia (PASEBA), como definida por Silva Filho *et al.* (1976), reúne um conjunto de quatro intrusões maiores (Itabuna, Complexo Floresta Azul, Araras e Itarantim), cerca de 20 *stocks* e, algumas centenas de diques. Todo este conjunto encontra-se distribuído em uma faixa de 8.500 km² orientada NE-SW por 140 km (Fig. 1). Os dados geocronológicos mais recentes (Teixeira *et al.* 1997, Corrêa Gomes 2000, Rosa *et al.* 2002, 2003) permitem inferir que o magmatismo da PASEBA foi ativo durante aproximadamente 60 Ma.

Os corpos alcalinos da PASEBA são intrusivos em rochas arqueano-paleoproterozóicas. Em sua parte nordeste, os maciços alcalinos são intrusivos em rochas granulíticas e a sudoeste, rochas gnáissico-migmatíticas (Fig. 1). A distribuição alinhada (NE-SW) dos corpos da PASEBA é interpretada por Mascarenhas (1979) como devida a controle tectônico regional e vários trabalhos posteriores ratificam esta hipótese (e.g. Lima *et al.* 1981, Corrêa Gomes 2000).

Os dados litogeoquímicos disponíveis sobre as rochas alcalinas da PASEBA (Rosa *et al.* 2003 e referências lá citadas) permitem caracterizar este magmatismo como alcalino sub-saturado em sílica e miasquítico, de ambiente intraplaca continental similar aos de *rift*.

MACIÇO NEFELINA-SIENÍTICO ITARANTIM O Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim (MNSI), cartografado por Barbosa de Deus *et al.* (1976) e Oliveira (2003), é um corpo com forma de pêra, com aproximadamente 220 km², intrusivo em rochas gnáissico-migmatíticas arqueano-paleoproterozóicas. Esta intrusão trunca as estruturas regionais, sendo parcialmente retrabalhada por falhas tardias (Fig. 2).

Os estudos realizados por Cordani *et al.* (1974) e Bernat *et al.* (1977) forneceram para o MNSI idades K-Ar e Ar-Ar em minerais variando de 474 Ma até 546 Ma. Rosa *et al.* (2002) obtiveram uma isócrona Rb-Sr em rochas cogenéticas com idade de 727 ± 30 Ma ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{inicial}} = 0,7031 \pm 0,0002$, MSWD = 1,5). Esta idade é interpretada por estes autores como a da cristalização deste maciço.

Segundo Oliveira (2003), o MNSI é constituído por 6 grupos de rochas: fenitos, aegirina-nefelina-sienito, biotita-nefelina-sienito, diques fonolíticos, pegmatitos nefelina-sieníticos e diques basálticos.

Os fenitos ocorrem como uma auréola descontínua ao maciço (Fig. 2). Nestes fenitos as estruturas pretéritas metamórficas (foliação, bandamentos e dobras) tendem a desaparecer nas proximidades da intrusão, a sua mineralogia é gradualmente substituída por feldspato alcalino, aegirina e anfibólio sódico, e suas composições evoluem de granitos para quartzo-sienitos até sienitos alcalinos. Alguns xenólitos de gnaiesses, com dezenas de metros, foram identificados na parte central deste maciço por Oliveira (2003). Nestes xenólitos, as estruturas, texturas e mineralogia originais foram totalmente destruídas. Eles apresentam-se como rochas isotrópicas, com grandes porfiroblastos de anfibólio sódico e de magnetita que se encontram imersos em uma matriz fortemente poligonizada e constituída por microclina, albita, quartzo, calcita, aegirina e titanita.

Os sienitos do MNSI apresentam granulação média a grossa, ocasionalmente pegmatítica, e exibem estrutura de fluxo magmático

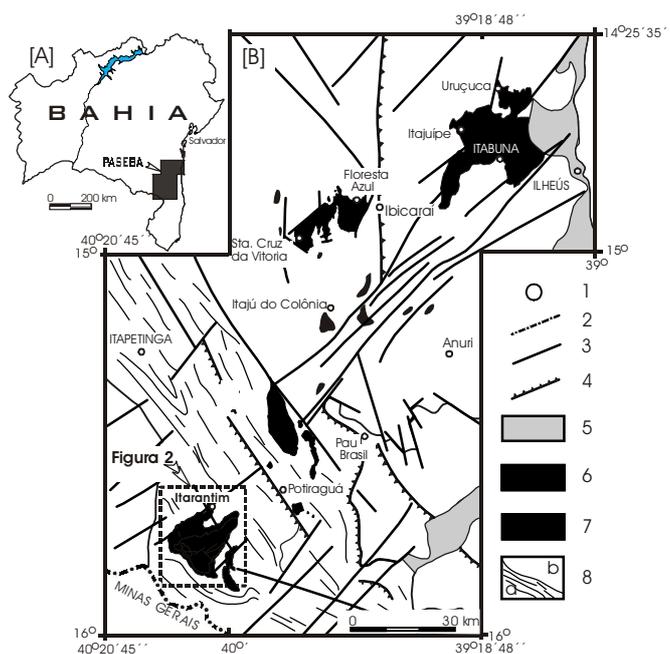


Figura 1 - Localização da área de ocorrência das rochas alcalinas neoproterozóicas do sul do Estado da Bahia [A]. Mapa geológico simplificado da Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia (Rosa *et al.* 2003) [B]. Cidades [1], limite estadual [2], falha e fratura [3], falha de cavalgamento [4], sedimentos recentes [5], maciços alcalinos neoproterozóicos [6], metassedimentos mesoproterozóicos [7], rochas arqueano-paleoproterozóicas [8, a = granulitos e b = granulitos e gnaiesses].

marcada pelo alinhamento dos prismas de feldspato alcalino e dos minerais máficos. Os dois conjuntos de nefelina-sienitos presentes no MNSI exibem contatos gradacionais entre si (Barbosa de Deus *et al.* 1976, Oliveira 2003). O aegirina-nefelina-sienito localiza-se na parte norte do maciço e o biotita-nefelina-sienito na porção sul (Fig. 2).

O aegirina-nefelina-sienito é marrom-escuro, onde a nefelina, macroscopicamente verde, cristalizou-se após o feldspato alcalino (perítico e antiperítico), ocupando os interstícios juntamente com cristais de aegirina-augita, aegirina, apatita e minerais opacos. A aegirina cristalizou-se após a nefelina e ocorre como cristais anédricos ou como coroa nos cristais de aegirina-augita e, ocasionalmente, em torno de alguns cristais de magnetita.

O biotita-nefelina-sienito é esbranquiçado a branco. A nefelina é mais precoce que nos sienitos com aegirina. Os feldspatos alcalinos subédricos antiperíticos dominam sobre os períticos e a biotita marrom subédrica é o máfico dominante. Os minerais acessórios são apatita, minerais opacos e hornblenda. Aegirina, calcita e titanita estão ocasionalmente presentes.

Os estudos de Oliveira (2003), com base em dados petrográficos e litogeoquímicos, apontam que os dois tipos de sienito do MNSI são cogenéticos e que o biotita-nefelina-sienito representa um termo mais evoluído que o aegirina-nefelina-sienito. Os elevados valores em ppm de Nb (90-200) e Y (40-100) foram interpretados por este mesmo autor como a expressão de um magma anorogênico associado a ambiente de *rift*. Estas rochas apresentam valores de ϵNd_t positivos (1,5-2,6) e baixas razões iniciais de Sr (0,7029-0,7031) indicativas de fonte no manto (Oliveira 2003).

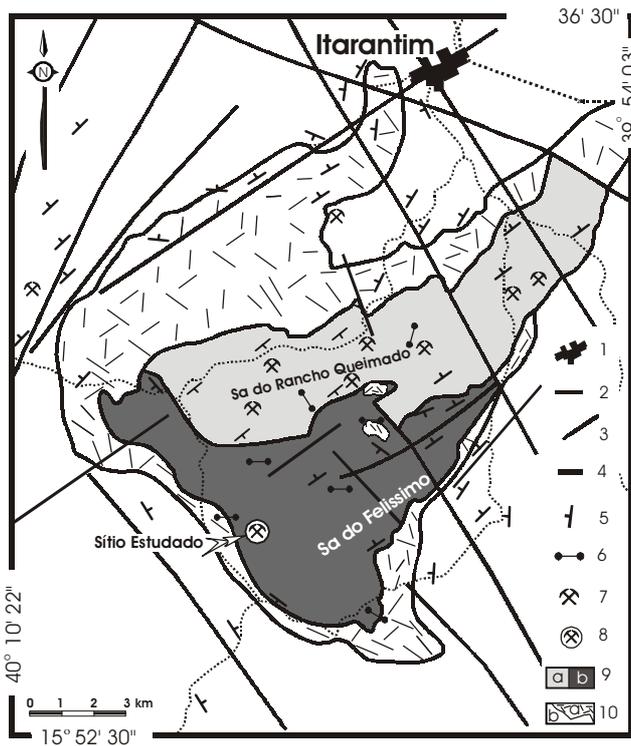


Figura 2 - Mapa geológico simplificado do Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim após Barbosa de Deus et al. (1976) e Oliveira (2003). Cidade [1], estrada [2], contato geológico [3], falha e fratura [4], foliação [5], dique [6], pedreiras em exploração de rocha ornamental [7], pedreira objeto deste estudo [8], Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim [9, a = aegirina-nefelina-sienito e b = biotita-nefelina-sienito], rochas gnáissico-migmatíticas do embasamento [10, a = fenitizadas e b = não transformadas].

Diques fonolíticos e pegmatitos alcalinos correm de forma esporádica nos dois conjuntos de sienitos, sendo mais abundantes, embora com menores dimensões, nos biotita-nefelina-sienitos. Os diques básicos presentes são corpos tabulares com espessuras inferiores a três metros, geralmente muito alterados e mais frequentes na parte sudeste do MNSI.

MÉTODOS ANALÍTICOS As 10 amostras selecionadas para o estudo do sítio mineralizado foram coletadas em uma pedreira onde se explota sodalita-sienito azul e todas elas foram inicialmente estudadas à luz do microscópio petrográfico. Em 6 destas amostras, com granulção fanerítica média e consideradas representativas das fácies petrográficas estudadas, analisou-se elementos maiores e alguns traços, inclusive os elementos terras raras (ETR). Estas análises químicas foram efetuadas pelo consórcio Geosol/Lakefield Ltda.

As amostras 2034 e 2035 (coordenadas UTM 379141-8251337 e 379146-8251340), que correspondem a sodalita-sienitos, foram selecionadas para determinação geocronológica pelo método Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão. Devido ao tamanho centimétrico (1-3 cm) dos cristais de zircão a extração foi efetuada manualmente, após a desagregação da rocha. Como estes cristais apresentavam-se com grande número de fraturas tardias, foram recuperados apenas uns poucos cristais perfeitos. Tanto os cristais quanto os fragmentos obtidos foram analisados a lupa

binocular, objetivando determinar a tipologia segundo o método de Pupin (1980) e selecionar os melhores grãos, sem fraturas e inclusões, para serem analisados. Para que pudessem ser encaixados no filamento “canoa”, estes grãos tiveram suas dimensões reduzidas a uma granulometria inferior a 0,6 mm.

As determinações isotópicas de Pb foram realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Pará, segundo a metodologia de evaporação de Köber (1987). As análises foram efetuadas em um espectrômetro de massa FINNIGAN MAT 262, onde a intensidade dos diferentes isótopos de Pb emitidos foi medida por um contador de íons, sendo que cada conjunto de 10 varreduras define um bloco de leitura. Com a média das razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos blocos lidos define-se a idade de cada etapa de aquecimento. Para o cálculo das idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ foram utilizadas as constantes de Steiger & Jäger (1977), sendo a precisão calculada para 2 sigmas (95%).

SÍTIO MINERALIZADO Geologia e Petrografia O sítio mineralizado em sodalita azul, explotado como rocha ornamental pela empresa ITABLUE localiza-se no interior do biotita-nefelina-sienito e constitui um dique pegmatítico que chega a alcançar a espessura máxima de 3 m. O esquema geológico (Fig. 3) e a figura 4 apresentam as relações de contato entre as diversas rochas e as principais texturas macroscópicas observadas em campo.

O biotita-nefelina-sienito encaixante da mineralização apresenta cor banca acinzentada, granulção média a grossa e uma foliação magmática (N52° 62°SW) que orienta os prismas de feldspato alcalino e as concentrações de minerais máficos. Os cristais de feldspato alcalino são peritíticos e incluem cristais euédricos de biotita, subédricos a anédricos de aegirina e subédricos de minerais opacos. As concentrações de minerais máficos reúnem cristais subédricos de biotita, hornblenda, magnetita, anédricos de pirita e, ocasionalmente, contêm calcita e fluorita.

Várias gerações de diques pegmatíticos foram identificadas na área da pedreira (Figs. 3 e 4). As mais antigas correspondem a hornblenda-nefelina-sienito e leuco-nefelina-sienito. Os diques de hornblenda-nefelina-sienito são corpos tabulares e contêm cristais centimétricos de hornblenda (até 2,6 cm), com ocorrência limitada aos contatos, e cristais de nefelina verde, mais abundantes em sua região central (Fig. 4A). As relações texturais indicam que a nefelina cristalizou-se nos interstícios dos cristais prismáticos

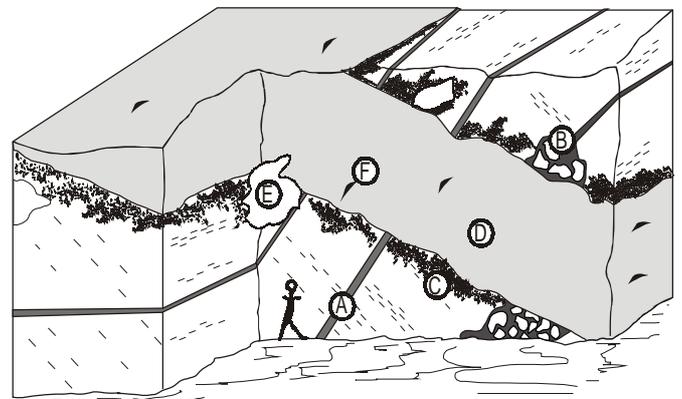


Figura 3 - Esquema geológico do dique mineralizado em sodalita-sienito de cor azul. A forma humana estilizada tem 1,65 m de altura. As letras correspondem as indicações dos locais onde foram tiradas as fotografias apresentadas na figura 4.

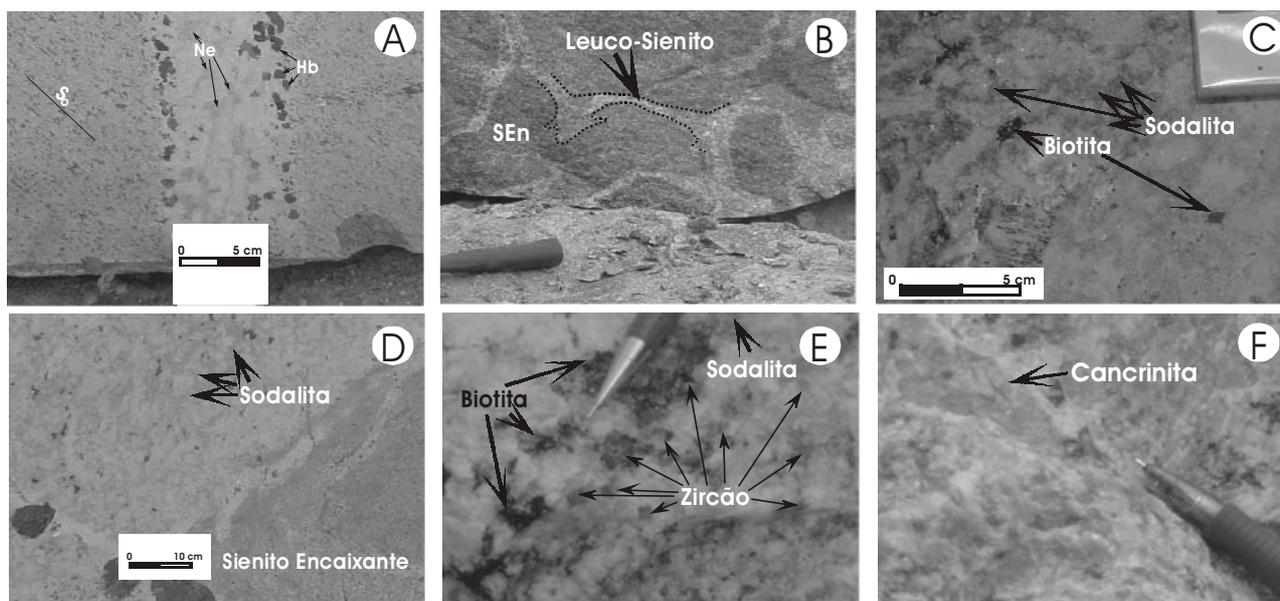


Figura 4 - Fotografias das regiões indicadas pelas letras A a F na figura 3. Dique de hornblenda-nefelina-sienito, com grandes cristais de nefelina (Ne) e hornblenda (Hb) com indicação da foliação magmática (So) do biotita-nefelina-sienito encaixante [A]. Dique de sienito leucocrático intrusivo nos biotita-nefelina-sienito encaixante [SEn] [B]. Região do sienito encaixante afetada por fluidos oriundos do dique de sodalita-sienito de cor azul; os grandes cristais de sodalita e de biotita são indicados pelas setas e os feldspatos alcalinos apresentam-se com tonalidade clara [C]. Região interna, com textura pegmatítica, do dique de sodalita-sienito de cor azul, sendo os cristais de sodalita (cor cinza escura), biotita (cor preta) e de feldspato alcalino (cor branca) [D]. Bolsão sienítico com sodalita e textura pegmatítica onde são indicados com setas os cristais centimétricos de zircão, sodalita e de biotita [E]. Vênula de cancrinita [F].

de feldspato potássico pertítico e albita antipertítica. Os diques de leuco-nefelina-sienito apresentam espessuras não superiores a 5 cm e a sua idade relativa não pode ser estabelecida com os diques anteriormente descritos. Eles são constituídos por feldspato alcalino pertítico, nefelina, cancrinita, calcita e, de forma subordinada, fluorita. Cristais de titatina são ocasionais. As relações geométricas existentes entre este dique com os sienitos encaixantes apontam para a existência de fenômeno de brechagem (Fig. 4B).

O dique sienítico mineralizado em sodalita azul (Fig. 4C) é uma rocha com granulação variável (média a grossa) na qual o volume de sodalita chega a atingir 40%. A distribuição relativamente homogênea da sodalita nesta rocha é o que lhe confere o valor comercial. Este dique é constituído essencialmente por feldspato alcalino pertítico, albita antipertítica, sodalita, nefelina e biotita, tendo como minerais acessórios aegirina, cancrinita, calcita, zircão, fluorita e minerais opacos. A sua colocação provoca transformações metassomáticas nas rochas sieníticas encaixantes. Macroscopicamente observa-se que a rocha sienítica encaixante perde a sua tonalidade original, adquirindo cor esbranquiçada e aparecem cristais de sodalita azul (Fig. 4D). Ao microscópio constata-se a presença de texturas de substituição nos minerais do sienito encaixante que foram interpretadas como a ação dos fluidos metassomáticos provenientes do dique. Com o aumento do metassomatismo, os feldspatos alcalinos são substituídos parcialmente pela sodalita e, nas fases finais deste processo, a cancrinita e calcita substituem ocasionalmente a sodalita. A biotita permanece na rocha após o metassomatismo, mas adquire uma cor marrom mais forte, sugerindo que sofreu igualmente a ação destes fluidos peralcalinos e ricos em cloreto. A atuação deste metassomatismo faz aparecer nas rochas transformadas uma textura poligonizada

inexistente nas rochas sieníticas encaixantes. Lateralmente nas encaixantes e internamente ao dique de sodalita-sienito azul têm-se bolsões pegmatíticos de coloração esbranquiçada. Dois conjuntos principais de bolsões pegmatíticos foram identificados. O primeiro corresponde à biotita-sodalita-sienito e ocorre tanto nos contatos quanto no interior do dique de sodalita azul. Ele é constituído essencialmente por feldspatos alcalinos pertíticos e antipertíticos, o máfico dominante é a biotita, tem-se sodalita e cristais centimétricos de zircão com até 4 cm (Fig. 4E). O segundo tipo de bolsão, desprovido de cristais de zircão, corresponde a sodalita-sienitos com especularita e com grandes agregados de cristais de sodalita. Vênulas tardias com espessuras centimétricas (2 até 4 cm) são presentes, apresentam distribuição aleatória e cortam indistintamente os diques descritos, os bolsões e o sienito encaixante. O tipo mais abundante de vênula preenchido essencialmente por cancrinita (Fig. 4F), macroscopicamente de cor rósea, calcita e, mais raramente, fluorita.

Litogeoquímica Foram realizadas 6 análises químicas de rochas para este estudo. Duas são de sienitos encaixantes, sendo uma de sienito sem efeitos de metassomatismo visíveis a exame microscópico (2033) e outra com efeitos de metassomatismo identificado por substituição de minerais (2032). Três outras amostras (2021, 2030, 2034) correspondem a rochas faneríticas do dique de sodalita-sienito. A amostra 2035 é de bolsão sienítico com cristais de sodalita e zircão. Na tabela 1 são listados os dados químicos obtidos.

As rochas estudadas apresentam estreita variação de SiO₂ (53-58%), Al₂O₃ (18-23%), conteúdo em álcalis (Na₂O+K₂O) compreendido entre 8% e 16%, razão Na₂O/K₂O variando de 1,3 até 1,84, são predominantemente meteluminosas e a presença de sodalita

em algumas das rochas estudadas é indicada pelo elevado conteúdo em Cl (>5.000 ppm).

A rocha sienítica encaixante 2033, sem efeitos visíveis de transformação, diferencia-se das demais rochas (Tabela 1) pelos conteúdos mais baixos em Al₂O₃ (18,9%), Na₂O (5,6%), K₂O (3,2%), CO₂ (0,79%), Ga (18 ppm), Nb (132 ppm), Zr (159 ppm), Y (23 ppm), Rb (115 ppm) e altos valores de TiO₂ (1,3%), FeO (3,7%), MgO (1,6%), P₂O₅ (0,61%), Ba (5750 ppm), Sr (2235 ppm) e S (287 ppm). Comparando-se com a análise desta rocha com a do sienito encaixante que exhibe transformação (Tabela 1), aqui interpretados

Tabela 1 - Análises químicas das rochas sieníticas estudadas Média (10 amostras) de biotita-nefelina sienitos (Média). A razão La_N/Yb_N normalizadas ao Condrito CI de Evesen et al. (1978) e os parâmetros ANK = [Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)] e ANKC = [Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO)] em moles.

	Média	2033	2032	2021	2034	2030	2035
SiO ₂	58,30	56,5	56,6	53,6	56,0	57,6	55,6
Al ₂ O ₃	19,23	18,9	21,6	21,4	21,2	23,5	21,6
TiO ₂	0,74	1,3	0,21	0,26	0,35	0,16	0,24
Fe ₂ O ₃	1,30	2,1	0,86	1,3	2,3	1,7	2,3
FeO	3,29	3,7	1,1	2,8	2,4	0,57	2,3
MgO	0,82	1,6	0,14	0,33	0,67	0,12	0,56
MnO	0,15	0,15	0,07	0,18	0,24	0,09	0,21
CaO	2,00	4,2	5,5	1,1	1,9	0,87	1,1
Na ₂ O	6,90	5,6	6,0	9,6	6,9	9,4	8,1
K ₂ O	5,31	3,2	3,9	5,9	4,7	5,1	5,0
P ₂ O ₅	0,29	0,61	0,05	0,08	0,18	0,02	0,01
H ₂ O ⁺	0,56	0,78	2,21	0,66	1,3	0,49	0,74
H ₂ O ⁻	0,25	0,01	0,18	0,32	0,5	0,14	0,25
CO ₂	0,45	0,79	1,08	0,82	1,39	1,51	2,91
Total	99,44	99,43	99,49	98,35	100,03	101,27	100,92
F	550	680	150	600	1100	96	1200
Co	5	5	6	5	8	6	7
Cu	6	4	5	5	6	7	6
Pb	<5	<5	13	5	22	5	22
Ba	5980	5750	2098	500	703	787	643
Cl	270	267	154	>5000	>5000	>5000	>5000
Ga	26	18	36	36	45	49	52
Hf	10	<8	11	25	55	35	141
Nb	115	32	291	161	483	355	1372
Rb	116	<5	162	389	260	247	327
S	184	287	106	86	89	131	82
Sr	872	2235	1909	181	476	252	295
Ta	11	<5	25	11	51	10	169
Th	20	<5	<5	22	78	42	117
U	<10	<10	12	<10	26	25	74
Y	37	23	33	50	105	39	71
Zr	466	159	416	1008	2154	1341	>5000
La	42,22	37,45	38,34	34,37	109,2	49,1	73,42
Ce	76,72	63,76	55,69	69,19	210,2	80,45	155,2
Nd	28,28	27,6	12,46	21,21	68,61	18,915	49,49
Sm	5,16	5,026	2,098	4,156	14,8	3,546	9,849
Eu	2,34	3,504	0,676	0,723	2,187	0,678	1,503
Gd	3,42	3,539	1,473	2,893	11,55	2,457	6,58
Dy	1,85	2,027	0,839	1,936	8,5	1,425	4,698
Ho	0,35	0,319	0,116	0,388	1,609	0,245	0,823
Er	0,73	0,707	0,275	0,891	4,086	0,611	1,705
Yb	0,47	0,43	0,218	0,63	2,773	0,429	1,109
Lu	0,11	0,063	0,042	0,113	0,369	0,092	0,151
Total	163,56	144,425	112,227	136,5	433,884	157,948	304,528
Na ₂ O+K ₂ O	12,2	8,8	9,9	15,5	11,6	14,5	13,1
Na ₂ O/K ₂ O	1,3	1,75	1,54	1,63	1,47	1,84	1,62
Eu/Eu*		2,42	1,12	0,61	0,49	0,67	0,54
[La/Yb] _N		58,89	118,93	36,89	26,63	77,40	44,77
ANK		1,49	1,53	0,96	1,28	1,12	1,15
ANKC		0,93	0,89	0,88	1,06	1,04	1,04

como devido a colocação do dique mineralizado em sodalita, constata-se que existe aumento de Na₂O, K₂O, Al₂O₃, Ga, Nb, Rb, Ta, U, Y e Zr, que é seguido pela diminuição dos conteúdos de P₂O₅, Ba e Sr (Fig. 5A). Diferenças entre estas duas amostras são igualmente perceptíveis nos conteúdos dos ETR (Tabela 1) e se marcam pela anomalia positiva em Eu (2,42→1,12, Fig. 6A) e pelo aumento na razão (La/Yb)_N (58→118, Tabela 1).

As três amostras do dique mineralizado em sodalita (2021, 2030, 2034) apresentam importante variação no conteúdo em álcalis (Tabela 1), pequena variação em Al₂O₃ (21-23%) e razão Na₂O/K₂O

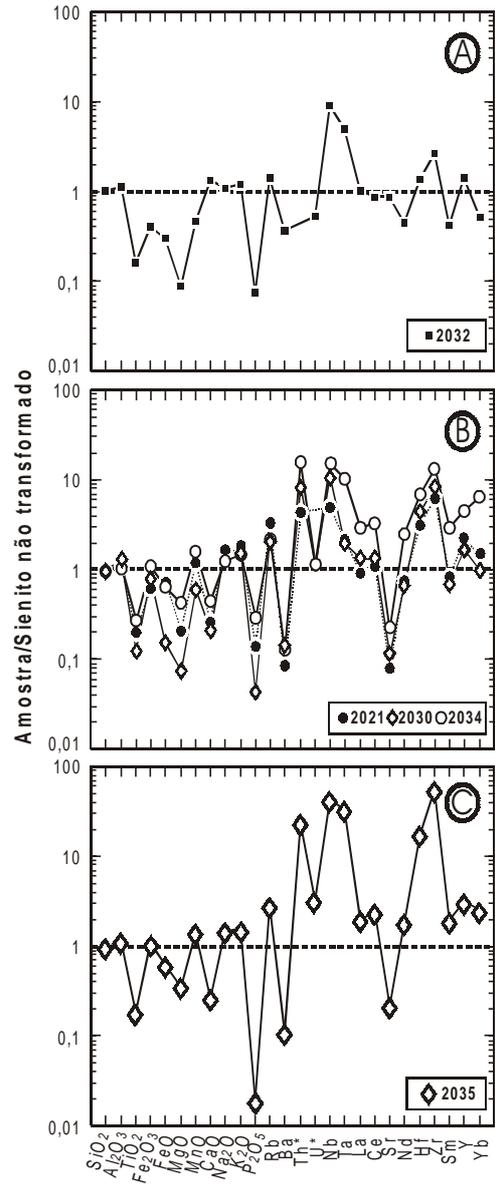


Figura 5 - Diagramas multielementares das rochas estudadas normalizados pela amostra do biotita-nefelina-sienito encaixante não afetado pelo metassomatismo (2033). Sienito encaixante transformado [A], rochas do dique de sodalita-sienito de cor azul [B] e bolsão de sodalita-sienito com cristais de zircão [C]. Os asteriscos no Th e U indicam que se utilizou os valores de 5 ppm e 10 ppm para a normalização e estes valores correspondem ao limite de detecção destes elementos.

compreendida entre 1,5 e 2,0. Os espectros destas rochas, normalizados pelo sienito sem evidências de alteração, são caracterizados pelo enriquecimento importante em Th, Nb e Zr (Fig. 5B). Os espectros dos ETR são marcados por anomalias em Eu (Fig. 6B) e variáveis razões $(La/Yb)_N$, compreendidas entre 26 e 77.

A amostra do bolsão sienítico com sodalita e zircão destaca-se das do dique sienítico com sodalita (Tab. 1) pelos elevados conteúdos em Zr (>5.000 ppm), Hf (141 ppm), Ta (169 ppm), Th (117 ppm), U (74 ppm) e F (1200 ppm). A curva obtida com a normalização pelo sienito sem evidências de alteração (Fig. 5B) e o espectro dos ETR (Fig. 6C) desta rocha são similares aos encontrados no dique sienítico com sodalita, indicando cogeneticidade.

Ordem de cristalização e tipologia dos cristais de zircão Os cristais de zircão analisados nas amostras 2034 e 2035 constituem uma população uniforme com cor castanha escura avermelhada e hábito caracterizado por prisma longo. Ao microscópio, não apresentam evidências de alteração e ocorrem com tamanhos variando de 1 mm até 4 cm. As texturas observadas indicam que o zircão cristaliza-se após o feldspato alcalino peritítico e antes da biotita, albita e sodalita. As fraturas presentes nestes cristais são sem preenchimento e afetam igualmente os outros minerais da rocha indicando seu caráter tardio.

Uma população constituída por cristais bem formados (4 da amostra 2034 e 10 da amostra 2035), com tamanhos em torno de 1 cm, foi analisada visando classificá-los segundo a tipologia proposta por Pupin (1980). Nesta população, identificou-se a existência de cristais dos tipos D e K1, com dominância do tipo D que, segundo Pupin & Turgo (1975), são característicos de rochas sieníticas sub-saturadas.

Idade Pb-Pb Na amostra 2034 foram analisados 8 fragmentos de cristais de zircão castanho-claro a escuro, com granulação entre 0,2 e 0,5 mm, translúcidos e sem inclusões. Entretanto, apenas 5 deles emitiram Pb suficiente para análise (Tabela 2). Os resultados obtidos forneceram uma idade de 720 ± 9 Ma (Fig. 7).

Na amostra 2035 foram analisados nove fragmentos de zircão de coloração castanha clara, com tamanhos compreendidos entre 0,1 mm e 0,6 mm, transparentes, translúcidos e sem apresentarem fraturas e inclusões. Destes, os fragmentos de números 3, 6 e 7 não emitiram Pb suficientes para análise. Os resultados obtidos do fragmento 8 foram descartados por apresentarem altos valores de Pb comum. Os outros seis forneceram um total de 9 blocos, dos quais foram descartados 4 (Tabela 2, Fig. 8). A idade calculada utilizando-se os blocos válidos foi de 732 ± 24 Ma.

Os resultados geocronológicos obtidos para as duas amostras analisadas mostram uma superposição de idades (711 – 729 Ma), sendo este intervalo aqui considerado como a idade mínima de cristalização da mineralização em sodalita-sienito azul.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES Comparando-se as idades encontradas para a cristalização do Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim (727 ± 30 Ma) com a da cristalização do sienito mineralizado em sodalita azul (720 ± 9 Ma e 732 ± 24 Ma) constata-se, considerando-se os erros envolvidos nestas determinações, que as formações destas rochas foram contemporâneas. Neste contexto, as idades mais novas obtidas por Cordani *et al.* (1974) e Bernat *et al.* (1977) para as rochas deste mesmo maciço refletem, provavelmente, perturbações nos sistemas isotópicos K-Ar e Ar-Ar nos minerais datados por eventos posteriores. As idades cambrianas obtidas por estes autores, situadas entre 520-546 Ma,

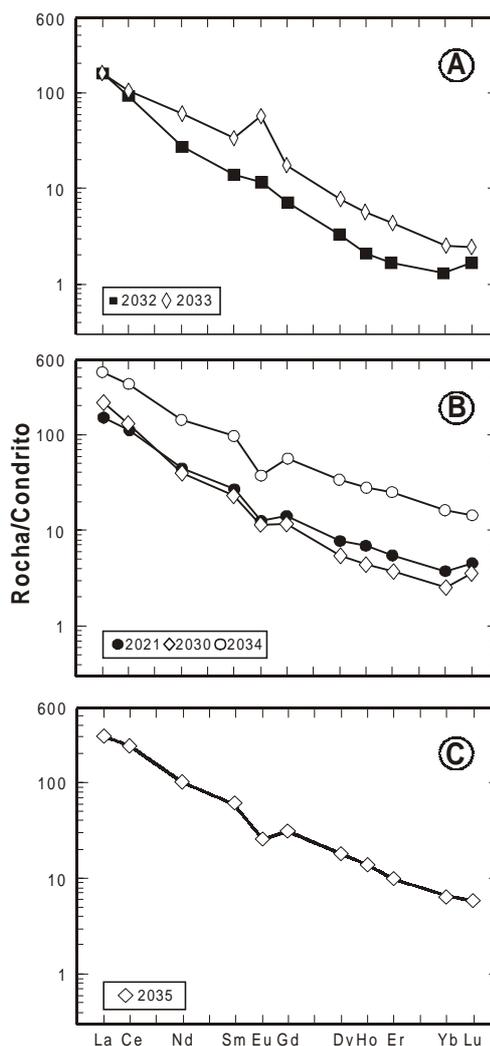


Figura 6 - Diagramas dos Elementos Terras Raras para as rochas estudadas normalizado pelo Condrito C1 de Evesen *et al.* (1978). Sienitos encaixantes [A], dique de sodalita-sienito [B] e sodalita-sienito com cristais de zircão [C].

podem traduzir os efeitos tardios da colisão Araçuai, localizada a sudoeste, que, segundo Pedrosa Soares *et al.* (2001), tem seu clímax em 550 Ma. As idades ordovicianas (474-485 Ma) são de difícil interpretação a luz dos dados disponíveis.

A disposição em dique do sodalita-sienito de cor azul presente no biotita-nefelina-sienito, sugere que o sienito azul representa um dos produtos gerados durante a diferenciação do magma responsável pela formação das rochas do Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim. A existência de importante área de fenitos coroando o maciço aponta para uma expressiva riqueza em fluidos deste magma. Por outro lado, a cristalização de feldspatos e o baixo volume de minerais hidratados formados durante a cristalização destas rochas - menor que 8% em volume segundo Oliveira (2003)-, sugerem que os produtos diferenciados da evolução do magma Itarantim tendem a ser enriquecidos em componentes voláteis. As presenças de sienitos com textura pegmatítica e de grandes cristais encontrados em muitos diques alcalinos presentes são a favor desta hipótese.

A existência de contatos retílineos e nítidos entre o dique de

Tabela 2 - Resultados analíticos obtidos pelo método Pb-Pb das amostras 2034 e 2035, rochas sodalita-sieníticas do sítio mineralizado estudado. Etapa de evaporação eliminada subjetivamente [*], razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ corrigida para contaminação do Pb comum [**].

Zircão	Temp. (°C)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)**	2σ	Idade (Ma)	2σ
2034/2	*1500	0,06539	41	0,06322	63	716	21
	1600	0,06421	56	0,06339	16	721	5
2034/3	*1500	0,07143	34	0,06119	99	646	35
	1600	0,07382	56	0,06240	47	688	16
2034/4	1500	0,08495	17	0,06373	63	733	21
2034/6	1450	0,06866	27	0,06326	38	717	13
2034/8	*1500	0,06607	56	0,06031	199	615	71
	*1585	0,06931	43	0,06311	32	712	11
	1620	0,06957	142	0,06355	32	727	11
2035/1	*1450	0,09816	59	0,05998	275	603	99
	*1500	0,07733	109	0,06114	112	644	39
	1550	0,08666	46	0,06253	65	693	22
2035/2	1600	0,09333	183	0,06315	196	714	66
2035/4	1500	0,11445	29	0,06577	138	799	44
2035/5	1550	0,06545	41	0,06355	67	727	22
2035/7	*1700	0,08405	36	0,06121	22	647	8
2035/9	*1500	0,06388	19	0,06222	50	682	17
	1550	0,06546	50	0,06409	45	745	15
	*1600	0,06877	42	0,06877	42	892	13

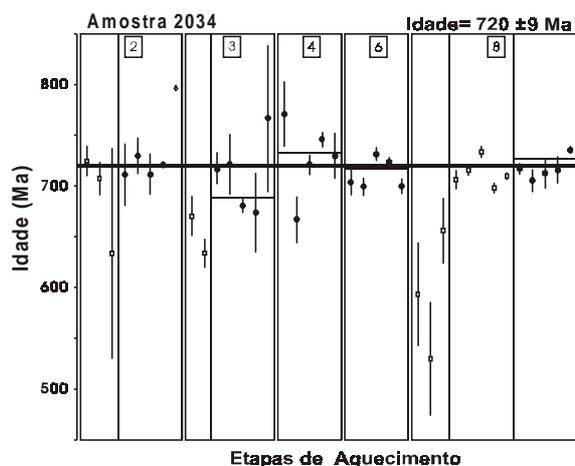


Figura 7 - Diagramas Etapas de Aquecimento versus Idade para a amostra 2034. Círculo cheio corresponde aos blocos analíticos utilizados no cálculo da idade; quadrado as etapas de evaporação eliminadas subjetivamente.

sienito azul, que trunca a foliação magmática do sienito encaixante, indica que esta já se apresentava, se não totalmente cristalizado, com alto percentual de cristais (>80% de cristais). Este fato é condizente com os dados experimentais disponíveis na literatura, que apontam temperaturas da ordem de 800-900°C para cristalização de nefelina-sienitos (MacDowell & Wyllie 1971) e de 400-800°C para a cristalização da sodalita (Deer et al. 1996). Por outro lado, os estudos experimentais realizados por Wellman (1970) colocaram em evidência que, quando a sodalita coexiste com nefelina e dois feldspatos, como é o caso do dique estudado, as temperaturas de cristalização situam-se entre 500°C e 600°C.

A presença de efeito metassomático nas rochas sieníticas em

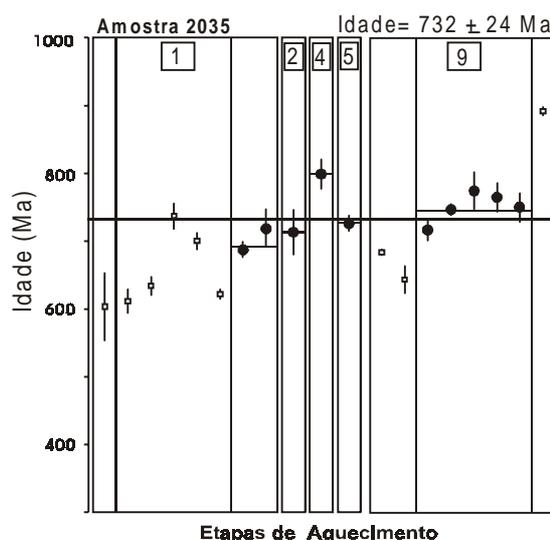


Figura 8 - Diagramas Etapas de Aquecimento versus Idade para a amostra 2035. Círculos cheios correspondem aos blocos analíticos utilizados no cálculo da idade; quadrado as etapas de evaporação eliminadas subjetivamente.

contato revela a existência de desequilíbrio físico-químico entre o magma pegmatítico e as encaixantes sieníticas. Este metassomatismo peralcalino e rico em cloro (sodalita tem até 8% Cl_2), afeta as encaixantes aportando álcalis e muitos dos elementos normalmente considerados imóveis (e.g. Nb, Ta, U, Y, Th, Zr), tendo-se igualmente o empobrecimento em Ba, Sr e ETR, particularmente o Eu (Fig. 6).

As rochas nefelina-sieníticas do MNSI não têm cristais de zircão e seus conteúdos em Zr são inferiores a 600 ppm (Oliveira 2003). Este fato é relativamente comum nos magmas peralcalinos sub-saturados em SiO_2 , onde Zr, devido aos valores da razão $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}) > 1$ no magma, não atinge a saturação necessária para impor a cristalização do zircão (Watson 1979), sendo o Zr normalmente incorporado à estrutura dos piroxênios alcalinos (Jones & Peckett 1980). Desta forma, o Zr permanece no magma até os diferenciados finais onde pode se cristalizar sob a forma de zircão ou de zirconsilicatos complexos. Os elevados valores de Zr (>1000 ppm) nos sienitos com sodalita estudados associados a presença de cristais de zircão são evidências consideradas suficientes para caracterizar a saturação de Zr neste magma pegmatítico.

Em resumo, a idade da mineralização em sodalita azul no Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim está compreendida entre 720 ± 9 Ma e 732 ± 24 Ma e estas rochas (dique e bolsão sienítico com sodalita) representam, provavelmente, a expressão de termos diferenciados, particularmente enriquecidos em Cl e Zr capazes de estabilizarem as cristalizações da sodalita e do zircão.

Agradecimentos O estudo das rochas da Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia está sendo desenvolvido com o apoio do CNPq (Proc. 462916/00 e 479509/01-8) e da Companhia Baiana de Pesquisa Mineral – CBPM (Convênio CBPM/UFBA/FAPEX nº 1460). M.L.S. Rosa agradece ao CNPq pela bolsa DCR (Proc. 30139/00) e à equipe do Pará-Iso pela acolhida durante o estágio em 2002. Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito. Esta é a contribuição de número 142 do Grupo de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral da UFBA.

Referências

- Barbosa de Deus P., Rangel P.A., Silveira W.P., Viana I.A., Alecrim J.D., Villas Boas A., Pamponet L.T.C., Araújo J.B., Rodrigues J.B., Cardoso P.C.S., Vasconcellos H.G., Garrido I.A.A., Ribeiro W., Bezerra A.T., Rego J.E., Silva N.S., Siqueira L.P., Bezerra J.C.L., Souto P.G. 1976. *Textos e fichas petrográficas. In: Projeto Rochas Alcalinas de Itarantim - Fase I - SMECPM, Salvador, 160 p.*
- Bernat M., Cordani U.G., Kawashita K. 1977. Ages $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ des massifs alcalins du sud de l'État de Bahia, Brésil. *Cashiers ORSTOM, Série Géologie, 9:35-43.*
- Brito Neves B.B., Cordani U.G., Torquato J.R.F. 1980. Evolução geocronológica do Pré-Cambriano do Estado da Bahia. In: Inda H.A.V. & Duarte F.B., *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Básicos, SME-CPM, 3:1-80.*
- Cordani U.G., Bernat M., Teixeira W., Kawashita H. 1974. Idades radiométricas das rochas alcalinas do Sul do Estado da Bahia. In: SBG Cong. Bras. Geol., 27, Porto Alegre, *Anais, 6:253-259*
- Corrêa Gomes L.C. 2000. *Evolução dinâmica da Zona de Cisalhamento neoproterozóica de Itabuna-Itajú do Colônia e do magmatismo fissural alcalino associado (SSE do Estado da Bahia, Brasil).* Inst. de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 201 p.
- Cunha M.P., Rosa M.L.S., Conceição H., Marinho M.M., Menezes R.C.L., Medeiros K.O.P., Brandão A.T. 2002. Sodalita-sienitos azuis da Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia: aspectos litogeoquímicos. In: SBG Congr. Bras. Geol., 41, João Pessoa, *Anais: 536.*
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1996. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals.* Logman Scientific & Technical, London. 696 p.
- Evesen N.M., Hamilton P.J., O'Nions R.K. 1978. Rare earth abundances in chondrite meteorites. *Geochim. Cosmoch. Acta, 42:1199-1212.*
- Fujimori S. 1978. *Rochas alcalinas da fazenda Hiassu, Itajú do Colônia, Bahia.* Publicação Especial da SBG-Núcleo Bahia-Sergipe, 2:117 p.
- Jones A.P. & Peckett A. 1980. Zirconium-bearing aegirines from Motzfeldt, South Greenland. *Contrib. Mineral. Petrol., 75:251-255.*
- Köber B. 1987. Single grain evaporation combined with Pb emitter bedding $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ investigations using thermal ion mass spectrometry and implications to zirconology. *Contrib. Mineral. Petrol., 96:63-71.*
- Lima M.I.C., Fonsêca E.G., Oliveira E.P., Ghignone J.I., Rocha R.M., Carmo U.F., Silva J.M.R., Siga Jr. O. 1981. *Geologia.* In: Projeto RADAMBRASIL. Programa de Integração Nacional, Folha SD.24 - Salvador, 24:24-192.
- McDowell S.D. & Wyllie P.J. 1971. Experimental studies of igneous rocks series: The Kungnât Complex of Southwest Greenland. *J. Geol. 79:173-194.*
- Martins A.A.M. & Santos R.A. 1993. *Ibicaraí, Folha SD.24-Y-B-V, escala 1:100.000.* Programa de Levantamentos Geológicos Básico do Brasil. MME-SMM-DNPM, Brasília, 192 p.
- Mascarenhas J.F. 1979. *Evolução geotectônica do pré-cambriano do Estado da Bahia.* In: Inda H.A.V. (ed). *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia. Textos Básicos, SME-CPRM, 2:57-165.*
- Menezes R.C.L., Rosa M.L.S., Conceição H., Medeiros K.O.P., Cunha M.P., Jesus V.F., Marques L.S., Marinho M.M., Brandão A.T., Oliveira A.E.L. 2002. Geologia e petrografia dos sodalita-sienitos azuis do Maciço Nefelina-Sienítico Rio Pardo. In: Congr. Bras. Geol., 41, João Pessoa, *Anais: 196.*
- Oliveira A.E.L. 2003. *Geologia, Petrografia, Litogeoquímica e idade Rb-Sr do Maciço Sienítico Itarantim, Sul do Estado da Bahia.* Inst. de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Dissertação de Mestrado, 110 p.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedmann C.M., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research 110:307-323.*
- Pupin J.-P. 1980. Zircon and Granite Petrology. *Contrib. Mineral. Petrol., 73:207-220.*
- Pupin J.-P. & Turgo G. 1975. Typologie du zircon accessoire dans les roches plutoniques dioritiques, granitiques et syénitiques. Facteurs essentiels déterminant les variations typologiques. *Pétrologie 1:139-156.*
- Rosa M.L.S., Conceição H., Macambira M.J.B., Marinho M.M., Marques L.S., Oliveira L.L. 2001. Idade (Pb-Pb), aspectos petrográficos e litogeoquímicos do Complexo alcalino Floresta azul (sul do estado da Bahia). *Rev. Bras. Geociências, 33:13-20.*
- Rosa M.L.S., Conceição H., Marinho M.M., Macambira M.J.B., Marques L.S. 2002. Geochronology of the South Bahia Alkaline Province (NE Brazil). *Geoch. Cosmoch. Acta, 66: A648*
- Silva Filho M.A., Moraes Filho O., Gil C.A.A. Santos R.A. 1976. *Projeto Sul da Bahia, Folha SD.24-Y-D.* Relatório Final, Convênio DNPM-CPRM, 1:164 p.
- Spínola V. 2003. Rochas ornamentais em arranjo produtivo. Superintendência de Estudos Econômicos e Sócios da Bahia, Série Estudos e Pesquisa, 121 p.
- Steiger R.H. & Jäger E. 1977. Subcommission on geochronology. Convention on the use of decay constants in geo and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Letters, 36:359-362.*
- Teixeira W., Kamo S.L., Arcanjo J.B.A. 1997. U-Pb zircon and baddeleyite age and tectonic interpretation of the Itabuna alkaline suite, São Francisco Craton, Brazil. *J. South Am. Earth Sci., 10:91-98.*
- Watson E.B. 1979. Zircon saturation in felsic liquids: experimental results and applications to trace element geochemistry. *Contrib. Mineral. Petrol., 70:407-419.*
- Wellman T.R. 1970. The stability of sodalite in synthetic syenite plus aqueous chloride fluid system. *J. Petrol. 11:49-71.*

Manuscrito A-1403

Recebido em 08 de janeiro de 2003

Revisão dos autores em 01 de maio de 2004

Revisão aceita em 20 de maio de 2004