

COMPORTAMENTO CRISTALOQUÍMICO DE MONAZITA PRIMÁRIA E HIDROTHERMAL DURANTE A EVOLUÇÃO DE GRANITOS E GREISENS: EXEMPLOS DAS SUBPROVÍNCIAS TOCANTINS E PARANÃ, GOIÁS

LUCIANA MIYAHARA TEIXEIRA & NILSON FRANCISQUINI BOTELHO

ABSTRACT *CHRISTALLOGHEMICAL BEHAVIOR OF PRIMARY AND HYDROTHERMAL MONAZITE DURING THE EVOLUTION OF GRANITES AND GREISENS: EXAMPLES FROM THE TOCANTINS AND PARANÃ SUBPROVINCES, GOIÁS, CENTRAL BRAZIL* Granite massifs in the Tocantins and Paranã tin subprovinces are Paleo- to Mesoproterozoic A-type granites, classified in two suites, g1, the oldest, and g2. Monazite is found in the latest evolved facies and in greisens of both suites. In both cases, this mineral is the main LREE carrier. Monazite is also abundant in the wall-rocks of the Serra Dourada Massif, related to the g2 suite. Monazite from the Paranã Subprovince shows higher LREE and lower ThO₂ contents than those of the Serra Dourada Massif. In both subprovinces a significant chemical difference between primary (unaltered granite-hosted) and hydrothermal (greisen-hosted) monazite was observed. In the Serra Dourada Massif, granite-hosted monazite shows high Th and low Ca contents compared to the monazite from the wall-rocks. Even though the occurrence of the mineral in the wall-rocks is considered to be related to the action of fluids of granite origin. The monazite composition presents huttonite/brabantite ratios > 1 in the granites and greisens of both subprovinces while in the wall-rocks of the Serra Dourada Massif these ratios are < 1. These differences are an additional tool to discriminate granitic gneisses of this massif border from some altered wall-rock paragneisses.

Keywords: monazite, Rare-Earth Elements, granite, greisen.

RESUMO Os maciços graníticos das Subprovíncias Tocantins (SPT) e Paranã (SPP) são constituídos por granitos do tipo A, de idade meso a paleoproterozóica, que foram individualizados nas suítes g1, mais antiga, e g2. A monazita ocorre nas fácies mais evoluídas e nos greisens de ambas as suítes, onde é o principal portador de ETRL, e na encaixante da borda sul do Maciço Serra Dourada (SPT) relacionado aos granitos g2. A monazita dos granitos g1 e g2 da Subprovíncia Paranã é mais rica em ETRL e mais pobre em ThO₂ que a do Maciço Serra Dourada. Em ambos casos existem diferenças químicas significativas entre a monazita primária, de granitos inalterados, e a hidrotermal, de greisens e albitos. A monazita do Maciço Serra Dourada é mais rica em Th e pobre em Ca que a da encaixante, cuja gênese é interpretada como derivada de fluidos originados dos granitos. A monazita de granitos e greisens de ambas as subprovíncias apresenta razão huttonita/brabantita > 1 enquanto a da encaixante do Maciço Serra Dourada apresenta razão < 1. Essas diferenças constituem ferramenta adicional na distinção entre o granito de borda da Serra Dourada, que é orientado e gnaissificado, e os paragneisses encaixantes.

Palavras-chaves: monazita, Elementos Terras Raras, granito, greisen.

INTRODUÇÃO Exceto o Eu, os minerais acessórios constituem os maiores reservatórios para os Elementos Terras Raras (ETR), Y, actínídeos (U e Th) e Elementos de Grande Raio Iônico (Hf, Nb, Ta, etc.) nos mais variados tipos de rocha. A monazita (Ce, La, Nd, Th) PO₄ é um acessório comum em rochas graníticas onde, juntamente com allanita e apatita, é o principal portador de Elementos Terras Raras Leves (ETRL), apresentando também teores apreciáveis de U e Th e pequenas quantidades de Elementos Terras Raras Pesadas (ETRP) e Y (Hinton & Paterson 1994, Bea *et al.* 1994, Bea 1996, Chang *et al.* 1996, Deer *et al.* 1997).

Apesar da grande importância petrogenética, poucos são os estudos sistemáticos via Microsonda Eletrônica em monazita de rochas graníticas (Maruéjol *et al.* 1990, Ward *et al.* 1992, Montel 1993, Wark e Miller 1993, Casilas *et al.* 1995, Bea 1996, Förster 1998). O presente artigo resulta do estudo, por Microsonda Eletrônica, de monazita de rochas graníticas mineralizadas em Sn da porção norte do estado de Goiás, e discute as suas variações composicionais e substituições cristaloquímicas.

GEOLOGIA REGIONAL A Província Estanífera de Goiás consiste de diversos corpos graníticos de idade paleo a neoproterozóica (Padilha & Laguna 1984, Marini & Botelho 1986,

Pimentel *et al.* 1991, 1999). A província foi subdividida em quatro subprovíncias por Marini & Botelho (1986), das quais as mais importantes são as subprovíncias Tocantins (SPT) e Paranã (SPP), onde se localizam as áreas estudadas (Fig. 1). Os maciços graníticos da SPT são intrusivos em rochas metassedimentares dos grupos Araí e Serra da Mesa e metassedimentares e paragneisses da Formação Ticunzal. Os granitos da Subprovíncia Paranã são intrusivos no embasamento granito-gnáissico e na Formação Ticunzal e lateralmente cobertos por rochas do Grupo Araí.

As subprovíncias Tocantins (SPT) e Paranã (SPP) compreendem granitos do tipo A, individualizados por Botelho (1992) em duas suítes. A suíte g1, encontrada apenas na Subprovíncia Paranã, é mais antiga, com 1,77 Ga. (U-Pb em zircão, Pimentel *et al.* 1991). São granitos potássicos de afinidade alcalina, têm incompatibilidade de Nb e Th durante a evolução magmática e alto conteúdo de Zr, Y e ETR. É constituída pelas fácies: g1a, biotita granodiorito com ilmenita, apatita, zircão e allanita como acessórios (concentrações inferiores a 0,5% em peso); g1b, biotita granito rosa apresentando zircão, allanita, apatita, monazita e xenotima como acessórios e cuja alteração se caracteriza pela transformação da biotita em siderofilita, destruição dos feldspatos e substituição da allanita e apatita por fases secundárias como a bri-

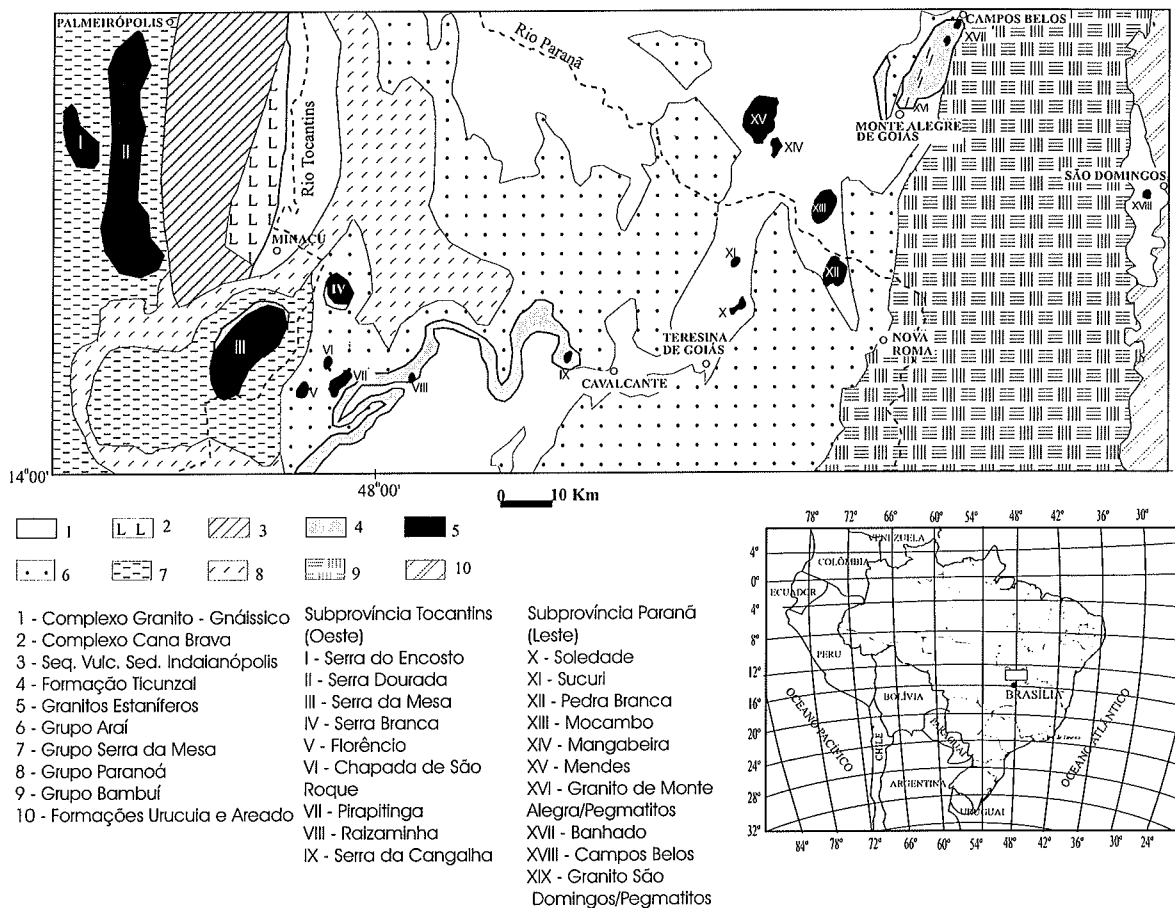


Figura 1 – Mapa geológico e de localização da área estudada.

tholita e a bastnaesita; e g1c, biotita granito com ilmenita, zircão, monazita e torita como acessórios. Greisens e granitos greisenizados desenvolvidos sobre g1c consistem de topázio e siderofilita litinífera ou quartzo e fengita litinífera.

Os granitos g2 são mais jovens, com idade entre 1,6 e 1,5 Ga. (U-Pb em zircão e isócronas Rb-Sr, Pimentel *et al.* 1991, Rossi *et al.* 1992, Botelho & Pimentel 1993). Ocorrem em ambas sub-províncias, mas são mais comuns na SPT. Possuem caráter metaluminoso a peraluminoso, menor razão K/Na e Fe₂O₃/MgO e conteúdos em SiO₂, Al₂O₃, Li, Sr e Ta mais elevados que os granitos g1. A suíte g2 é constituída pelas fácies g2b, biotita granito cinza a róseo com zircão, allanita, fluorita, apatita e xenotima como acessórios; g2c, muito semelhante à fácies g2b, dela diferindo pela ausência de apatita e allanita e menor quantidade de zircão. Sua alteração se caracteriza pela substituição da biotita por siderofilita. A fácies g2d é um biotita granito com fluorita, ilmenita, zircão, monazita e torita como acessórios. O granito g2d cristalizou na presença de importante fase fluída que provocou o seu autometasomatismo e a greisenização das encaixantes. Os greisens desenvolvidos sobre g2d consistem de fengita, quartzo e algum topázio (Botelho 1984, 1992). Por suas semelhanças químicas, os granitos da SPT se classificam como granitos g2 (Botelho 1992).

Na SPP, a monazita ocorre em amostras das suítes g1 e g2 coletadas nos maciços Pedra Branca e Mangabeira (Fig. 1). Detalhes descritivos desses maciços podem ser obtidos em Botelho (1984, 1992), Moura (1993) e Freitas (2000). Na SPT a monazita

ocorre no Maciço Serra Dourada, único da região a ser estudado e detalhado por Macambira (1983) e Bilal (1991).

MÉTODOS ANALÍTICOS Os minerais foram analisados por Microsonda Eletrônica CAMECA SX-50 do IG – UnB, equipada com 4 espectrômetros, sistema de dispersão de comprimento de onda e ângulo de *take off* de 40°. A correção dos efeitos de matriz foi feita com o programa PAP. A voltagem de aceleração foi de 15 kV, corrente de 25nA e tempo de contagem de 10s para P, Si, Ca, U e Th, e voltagem de aceleração de 20kV, corrente de 40nA e tempo de contagem de 20s para Y e os ETR. O tempo de contagem no *background* foi metade do medido no pico.

As linhas espectrais utilizadas foram SiKα, PKα, YKα, CaKα, LaLα, CeLα, EuLα, YbLα, PrLβ, SmLβ, GdLβ, DyLβ, NdLβ, UMα, ThMα. A correção de LaLα no Pr, CeLβ no Nd, PrLβ no Eu e CeLγ no Gd foi realizada mediante os parâmetros de Åmli & Griffin (1975). Os cristais analíticos utilizados foram LIF para os ETR, TAP para Si e Y e PET para P, Th, U e Ca. Como padrões empregou-se óxidos sintéticos de ETR, metais puros para U e Th e minerais naturais para os demais elementos. Os limites de detecção variaram entre 400 ppm e 500 ppm para todos os elementos analisados.

DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA Nas amostras da SPP, a monazita foi petrograficamente individualizada em primária, quando encontrada em granitos inalterados das fácies mais

evolúidas das suítes g1 e g2 (g1c, g2c e g2d), e hidrotermal, quando em greisens, mesmo os desenvolvidos a partir das fácies menos evolúidas. Tanto a monazita primária quanto a hidrotermal ocorrem como grãos anédricos, de 100µm e 1000µm, podendo ou não apresentar inclusões de óxido de ferro que lhes dão aspecto sujo. No granito, a monazita ocorre associada à biotita e, mais raramente, a quartzo e feldspato. Nos greisens ela se associa a minerais secundários, hidrotermais, como fengita, siderofilita e fluorita.

A monazita do Maciço Serra Dourada foi individualizada em primária, quando em amostras de granito inalterado, e hidrotermal, quando em rochas de alteração hidrotermal, como albititos. O mineral também ocorre na encaixante greisenizada da borda sul do maciço, onde sua quantidade diminui com a distância do maciço, sugerindo que se trata de mineral hidrotermal, formado a partir de fluidos provenientes do granito que alteraram a encaixante. No maciço, tanto a fase primária quanto a hidrotermal ocorrem como grãos anédricos, com cerca de 200µm, são incolores a amarelados, em associação ou inclusos em quartzo e feldspato (granito) ou biotita (albitito). A monazita da encaixante é arredondada, o que sugere sua instabilidade frente ao fluido hidrotermal durante a sua formação, seu diâmetro situa-se entre 200µm e 300µm e está geralmente incluída em biotita metamórfica.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA Textural e química-mente, é possível individualizar os cristais de monazita em um grupo do Maciço Serra Dourada e outro dos granitos g1 e g2 da SPP, cada qual comportando fases primária e hidrotermal. No diagrama de Bowie & Horne (1953) (Fig. 2), a maioria dos resultados analíticos situa-se no domínio da monazita, com algumas análises do Maciço Serra Dourada localizadas na zona limítrofe do domínio da monazita huttonítica. A monazita da SPP (Tabela 1) é mais rica em ETRL₂O₃ (entre 55% e 70%, a maioria entre 60% e 70%) e mais pobre em CaO (0,07% a 0,50%) e ThO₂ (0,46% a 9,91%, a maioria entre 0,46% e 4,61%) que a monazita do Maciço Serra Dourada, onde o mineral contém ETRL entre 50% e 60%, CaO entre 0,24% e 1,42% e ThO₂ entre 3,60% e 17,15% (a maioria acima de 6%).

Em todos cristais de monazita estudados, os conteúdos de UO₂ são inferiores a 1% (Tabela 1), semelhantes aos observados por Cuney & Friedrich (1987) em monazita de granitos. Y₂O₃ e ETRP₂O₃ situam-se entre 0,05% e 1,07% e 0,53% e 3,5% respectivamente em todos cristais, semelhante ao observado por Chang *et al.* (1996), Della Ventura *et al.* (1996) e Rosenblun & Fleischer (1996) em monazita de granitos e pegmatitos graníticos. Dentre os ETRL, são sempre mais ricas em Ce, seguido, em ordem decrescente, por La, Nd, Pr e Sm.

Os totais da maioria das análises são inferiores ou próximos de 98%, o que se deve à presença de elementos não analisados ou à metamictização. Embora o somatório dos átomos que ocupam o poliedro e o somatório dos átomos do sítio dodecaédrico sejam próximos a 1, não pode ser descartada a presença de elementos não analisados como Fe, F, Al, e Pb radiogênico (Kucha 1980, Chang *et al.* 1996, Förster 1998). Os baixos totais também podem ser devidos à metamictização da monazita, que não apenas destrói a estrutura do mineral quanto lhe adiciona água (Pabst 1952).

Monazita da Subprovíncia Paraná Apesar da super-posição dos dados, a monazita primária da suíte g1 é mais rica em Pr₂O₃ que a de g2, enquanto a secundária da suíte g1 é mais pobre em Ce₂O₃ e La₂O₃ que a de g2 (Figs. 3 e 4).

A monazita primária da suíte g1 é mais pobre em Pr₂O₃ e mais rica em La₂O₃ que a secundária, e, na suíte g2, a primária é mais pobre em Ce₂O₃ e Pr₂O₃ que a secundária (Figs. 3 e 4).

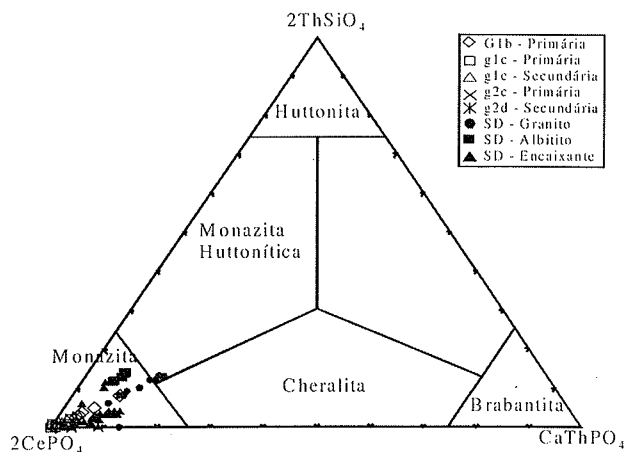


Figura 2 – Diagrama de Bowie & Horne (1953) de classificação de minerais do grupo da monazita

Os conteúdos em CaO da monazita da SPP são sempre inferiores a 0,5% (Fig. 5). Embora os teores de ThO₂ dessa variem entre 0,46% e 9,91%, a maioria dos dados situa-se entre 0,5 e 3% e são semelhantes aos de monazita de granitos do tipo A, como descrito por Charoy & Pollard (1989) e Förster (1998).

As figuras 6a e b mostram os padrões de ETR normalizados ao condrito de cristais de monazita das suítes g1 e g2 respectivamente. Em ambas, os padrões são semelhantes entre si, aproximadamente coincidentes do La ao Nd e fortemente descendentes, com razões (La/Gd)_N entre 50 e 100 na monazita de g1, e entre 30 e 100 na de g2. Apresentam dispersão dos dados na região dos ETRP. Não se constatou diferenças entre os padrões de monazita primária e secundária.

Monazita do Maciço Serra Dourada Mesmo que os dados de monazita do Maciço Serra Dourada constituam um conjunto quimicamente distinto da SPP, a encontrada em granitos e albititos é mais pobre em Ce₂O₃ e La₂O₃ e mais rica em ETRP₂O₃, UO₂ e ThO₂ que a da encaixante greisenizada (Figs. 3 a 5 e Tabela 1). A última é mais rica em Pr₂O₃, P₂O₅ e CaO e mais pobre em SiO₂ que a monazita do maciço. A do Maciço Serra Dourada (primária, hidrotermal e encaixante greisenizada) tende a ocupar o mesmo domínio composicional da monazita primária da fácies g2c (Figs. 3 e 4), o que está de acordo com o observado por Botelho (1992) de que os granitos da SPT pertencem à suíte g2. Diferem pelos baixos conteúdos em ThO₂ apresentado pela monazita da SPP em relação a do Maciço Serra Dourada.

A diminuição da quantidade de monazita na encaixante com a distância do maciço sugere que o mineral se formou durante a greisenização provocada pela intrusão do granito. A diferença composicional entre a monazita do albitito e a da encaixante, ambas hidrotermais, reflete fluidos hidrotermais distintos ou, alternativamente, interação de um mesmo fluido com rochas de composição diferente. Embora pouco provável, dadas às evidências de campo, não deve ser descartada a hipótese de que a monazita da encaixante se formou por metamorfismo na fácies anfibolito durante o ciclo Brasileiro, de efeitos visíveis na região.

Com relação aos conteúdos em CaO e ThO₂, a monazita do maciço e da encaixante constituem grupos distintos (Fig. 5). Um é representado pelo mineral no maciço, cujos teores de CaO são inferiores a 0,5% e tem teores anômalos de ThO₂ (8% a 17%).

Tabela 1 – Resultados de análises químicas pontuais representativas dos cristais de monazita estudados. De um total superior a 100 pontos analisados, selecionou-se os que melhor representam as variações químicas. O total das análises realizadas está disponível em Teixeira (2002).

Amostra	SPP - g1 - Primária										SPP - g1 - Hidrotermal										g2 - Primária										SPP - g2 - Hidrotermal										Serra Dourada										granito										Serre Dourada										Encaxeante									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31																																																	
P ₂ O ₅	29,11	26,50	24,27	29,09	29,40	29,65	28,28	28,10	28,65	27,91	26,56	28,75	25,87	26,89	21,53	29,38	29,24	28,67	29,85	28,71	25,65	24,47	23,59	24,74	23,79	29,42	27,81	28,22	28,10	28,31	27,32																																																	
CaO	0,07	0,16	0,15	0,09	0,09	0,13	0,41	0,08	0,08	0,15	0,29	0,13	0,17	0,21	0,92	nd.	0,17	0,17	nd.	0,09	0,41	0,43	0,24	0,44	0,49	0,65	1,42	1,09	1,12	0,44	0,97																																																	
ThO ₂	0,63	4,51	9,91	1,09	0,46	1,37	4,61	2,95	2,56	2,59	2,14	1,64	3,99	2,08	4,10	0,20	2,89	2,88	0,37	0,99	10,50	11,03	17,16	13,42	16,22	3,92	10,93	7,81	6,37	2,50	5,25																																																	
SiO ₂	0,26	2,46	2,75	0,29	0,15	0,24	0,73	0,84	0,53	0,65	1,76	0,18	2,29	0,55	2,65	0,15	0,51	0,54	0,24	0,38	2,12	2,47	3,91	2,80	3,65	0,31	1,13	0,72	0,51	2,20	0,46																																																	
Y ₂ O ₃	0,08	1,07	0,40	0,28	0,34	0,35	0,05	0,08	nd.	nd.	0,21	0,08	0,44	0,50	0,83	nd.	0,10	0,06	nd.	0,13	0,25	0,23	0,14	0,24	0,70	0,64	0,80	0,64	0,81	0,77	0,82																																																	
UO ₂	0,08	0,27	0,27	0,18	0,15	0,07	nd.	nd.	0,06	nd.	nd.	0,05	0,17	0,08	0,41	0,14	nd.	nd.	0,06	nd.	0,14	0,31	0,28	0,49	0,36	0,33	0,30	0,37	0,26	0,69																																																		
La ₂ O ₃	17,38	13,24	12,51	15,38	14,46	15,50	12,51	10,74	15,02	9,77	10,43	12,06	16,39	13,97	13,56	14,31	15,83	12,87	13,86	14,50	15,78	15,41	14,70	14,84	12,78	15,07	12,10	12,93	14,14	15,28	14,41																																																	
Ce ₂ O ₃	34,46	29,19	28,09	33,99	33,91	35,39	31,92	33,33	34,66	33,70	29,70	34,14	30,02	28,13	28,43	38,93	35,19	36,18	38,10	35,01	28,78	27,71	26,78	27,31	23,29	31,11	24,04	26,74	28,16	29,84	26,49																																																	
Pr ₂ O ₃	3,22	3,26	3,33	3,00	3,15	2,88	3,50	3,81	3,17	3,72	3,43	3,46	2,26	2,33	2,19	3,67	3,20	3,62	3,51	3,29	2,28	2,46	2,19	2,32	2,05	2,95	2,40	2,71	2,30	2,60	2,41																																																	
Nd ₂ O ₃	10,58	10,01	10,59	10,20	10,79	9,37	11,81	13,05	9,68	13,29	13,89	14,07	9,29	9,13	9,09	10,25	8,85	10,71	10,74	10,84	8,33	8,18	7,35	8,06	9,06	10,03	9,95	11,28	9,68	11,08	10,45																																																	
Sm ₂ O ₃	1,14	1,63	1,41	1,69	2,11	1,56	2,07	2,52	1,26	2,56	3,12	2,41	1,21	1,52	1,48	1,09	1,46	1,72	1,06	1,75	1,23	1,16	0,87	1,32	1,77	1,30	1,99	1,93	1,65	1,93	2,25																																																	
Eu ₂ O ₃	0,46	0,59	0,56	0,52	0,57	0,48	0,55	0,59	0,48	0,69	0,48	0,55	0,40	0,40	0,40	0,53	0,49	0,55	0,50	0,50	0,35	0,33	0,30	0,27	0,30	0,58	0,46	0,54	0,48	0,43	0,41																																																	
Gd ₂ O ₃	0,53	1,44	0,81	1,02	1,14	0,88	0,82	0,74	0,48	0,79	1,31	0,66	0,79	1,10	1,16	0,11	0,53	0,53	0,05	0,59	0,61	0,69	0,60	0,64	1,30	0,68	1,70	1,31	0,91	1,21	1,58																																																	
Dy ₂ O ₃	nd.	0,81	0,23	0,50	0,62	0,44	0,20	0,23	0,16	0,05	0,27	0,18	0,31	0,61	0,62	nd.	0,25	0,11	nd.	0,08	0,26	0,32	0,07	0,28	0,75	0,41	0,66	0,42	0,46	0,52	0,54																																																	
Yb ₂ O ₃	nd.	0,11	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	0,09	0,05	0,04	nd.	0,07	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.																																																	
Total	98,01	95,25	95,31	97,33	97,33	98,30	97,49	97,08	96,82	95,88	95,59	98,35	93,61	87,50	87,24	98,75	98,70	98,61	98,46	96,87	96,56	95,10	98,26	97,02	96,64	97,49	95,71	96,60	95,04	95,35	94,06																																																	

Formula Estrutural Calculada com Base em Quatro Oxigênios

	P ⁴⁺	Ca ²⁺	Th ⁴⁺	Si ⁴⁺	Y ³⁺	U ⁴⁺	La ³⁺	Ce ³⁺	Pr ³⁺	Nd ³⁺	Sm ³⁺	Eu ³⁺	Gd ³⁺	Dy ³⁺	Yb ³⁺	TOTAL	O ²⁻
	0,989	0,003	0,006	0,011	0,002	0,001	0,257	0,506	0,047	0,152	0,016	0,006	0,007	0,011	0,001	2,003	4
	0,925	0,007	0,042	0,101	0,023	0,002	0,201	0,441	0,049	0,147	0,023	0,008	0,020	0,012	0,011	2,004	4
	0,880	0,007	0,097	0,118	0,009	0,003	0,198	0,441	0,052	0,162	0,021	0,008	0,012	0,014	0,003	2,010	4
	0,993	0,004	0,010	0,011	0,006	0,002	0,229	0,502	0,044	0,155	0,023	0,007	0,014	0,015	0,006	1,998	4
	1,000	0,004	0,012	0,006	0,007	0,001	0,227	0,475	0,046	0,133	0,021	0,007	0,014	0,012	0,006	1,997	4
	0,998	0,005	0,043	0,030	0,007	0,001	0,187	0,475	0,042	0,171	0,029	0,008	0,011	0,011	0,003	1,996	4
	0,973	0,018	0,027	0,034	0,002	-	0,162	0,498	0,057	0,190	0,035	0,008	0,010	0,010	0,003	2,000	4
	0,970	0,004	0,024	0,022	-	0,001	0,225	0,515	0,047	0,140	0,036	0,007	0,010	0,006	0,002	1,996	4
	0,985	0,003	0,024	0,022	-	-	0,149	0,509	0,056	0,196	0,036	0,006	0,010	0,011	0,004	2,001	4
	0,976	0,007	0,020	0,015	0,001	-	0,162	0,457	0,053	0,203	0,045	0,008	0,007	0,008	0,002	2,010	4
	0,945	0,013	0,020	0,015	0,005	-	0,180	0,505	0,051	0,203	0,034	0,006	0,011	0,018	0,004	2,005	4
	0,984	0,006	0,038	0,021	0,002	-	0,255	0,463	0,035	0,140	0,034	0,006	0,006	0,011	0,001	2,008	4
	0,923	0,008	0,044	0,044	0,010	0,004	0,227	0,487	0,037	0,144	0,023	0,006	0,007	0,007	0,009	1,986	4
	1,003	0,010	0,044	0,044	0,002	-	0,210	0,513	0,046	0,152	0,024	0,006	0,007	0,007	0,001	2,057	4
	0,852	0,004	0,002	0,002	0,000	0,001	0,233	0,513	0,026	0,126	0,015	0,007	0,007	0,007	0,003	2,003	4
	0,922	0,007	0,026	0,026	0,003	0,001	0,233	0,513	0,026	0,126	0,015	0,007	0,007	0,007	0,001	1,996	4
	0,986	0,007	0,026	0,026	0,003	0,001	0,217	0,520	0,049	0,154	0,024	0,007	0,008	0,008	0,001	1,999	4
	0,976	0,001	0,009	0,009	0,005	-	0,244	0,442	0,035	0,125	0,014	0,007	0,008	0,008	0,001	2,002	4
	1,000	0,004	0,010	0,010	0,009	0,003	0,217	0,442	0,035	0,125	0,014	0,007	0,008	0,008	0,001	2,003	4
	0,987	0,010	0,108	0,108	0,005	0,001	0,244	0,435	0,035	0,125	0,013	0,004	0,004	0,004	0,001	2,003	4
	0,989	0,018	0,108	0,108	0,005	0,003	0,228	0,413	0,034	0,121	0,019	0,004	0,004	0,004	0,001	1,999	4
	0,884	0,011	0,129	0,129	0,005	0,005	0,230	0,421	0,032	0,137	0,019	0,004	0,004	0,004	0,001	2,001	4
	0,882	0,020	0,157	0,157	0,005	0,005	0,200	0,421	0,032	0,137	0,019	0,004	0,004	0,004	0,001	1,999	4
	0,855	0,022	0,157	0,157	0,005	0,005	0,200	0,421	0,032	0,137	0,019	0,004	0,004	0,004	0,001	1,999	4
	0,966	0,062	0,102	0,102	0,008	0,008	0,222	0,456	0,043	0,143	0,026	0,008	0,008	0,008	0,001	1,995	4
	0,967	0,047	0,072	0,072	0,008	0,008	0,222	0,456	0,043	0,143	0,026	0,008	0,008	0,008	0,001	1,992	4
	0,982	0,049	0,060	0,060	0,008	0,008	0,222	0,456	0,043	0,143	0,026	0,008	0,008	0,008	0,001	1,998	4
	0,989	0,020	0,023	0,023	0,008	0,008	0,222	0,456	0,043	0,143	0,026	0,008	0,008	0,008	0,001	2,000	4
	0,974	0,044	0,050	0,050	0,008	0,008	0,224	0,451	0,037	0,157	0,033	0,006	0,006	0,006	0,007	2,002	4

Outro compreende a monazita da encaixante greisenizada, que é mais pobre em Th (entre 2,5% e 12%) que a do maciço, e cujos conteúdos em CaO são superiores a 0,5% (Fig. 5). O conteúdo em ThO₂ da monazita do maciço é superior ao comumente observado em monazita de granitos (Charoy & Pollard 1989, Förster 1998), e mesmo de monazita de outros ambientes (Demartin *et al.* 1991, Chang *et al.* 1996, Rosenblum & Fleischer 1996). Seu conteúdo

em ThO₂ só é superado pelo da que ocorre em pegmatitos alpinos (até 23% - Demartin *et al.* 1991) e da de rochas vulcânicas alcalinas do Complexo de Vico, Itália (até 27%, Della Ventura *et al.* 1996).

As figuras 7a e b mostram os padrões de ETR normalizados ao condrito de cristais de monazita do Maciço Serra Dourada e da encaixante greisenizada, respectivamente. Em ambas, os padrões são semelhantes entre si, com curvas fortemente des-cendentes, aproximadamente coincidentes do La ao Nd, e dispersão na região dos ETRP. Diferem no grau de fracionamento, com razões (La/Gd)_N entre 20 e 60 na monazita de granito e albitito e entre 20 e 35 na da encaixante greisenizada. Em geral, os padrões se assemelham aos da monazita da SPP (Figs. 6 e 7), mas diferem no grau de fracionamento e na menor variação de Sm, Gd e Dy em relação à monazita da SPT.

CRISTALOQUÍMICA E EQUAÇÕES DE SUBSTITUIÇÃO

A estrutura da monazita consiste em cadeias que se propagam na direção do eixo *c* cristalográfico *c*, constituídas de poliedros irregulares ETRLO₉ intercalados de tetraedros PO₄, que se unem lateralmente pelo compartilhamento de arestas entre os poliedros (Ni *et al.* 1995). A monazita possui fórmula geral ABO₄, onde o sítio A, poliedro irregular, é ocupado por ETR³⁺, Y³⁺, Th⁴⁺, U⁴⁺, Ca²⁺, etc, e o sítio B, tetraedro, por P⁵⁺ e Si⁴⁺.

As principais substituições observadas na monazita são:

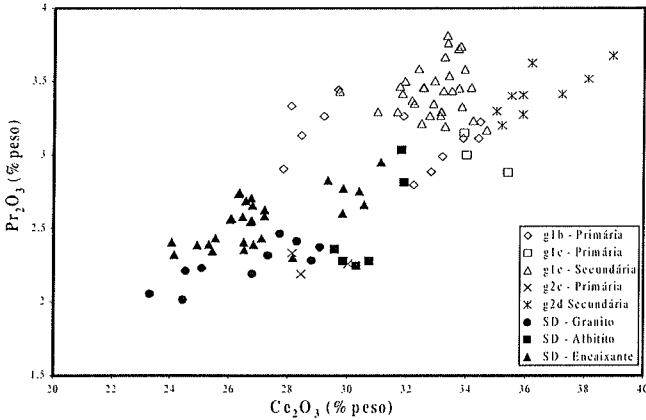
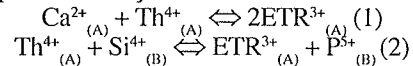


Figura 3 – Diagrama Pr₂O₃ x Ce₂O₃ (% peso) mostrando a individualização dos domínios de composição de monazita primária das suítes g1 e g2.

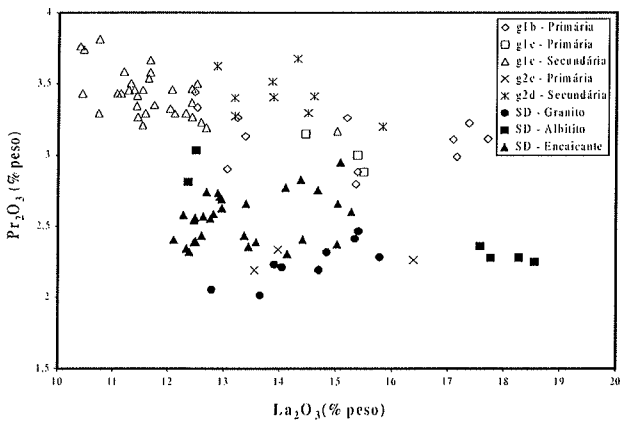


Figura 4 – Diagrama Pr₂O₃ x La₂O₃ (% peso) de monazita da SPP e do Maciço Serra Dourada

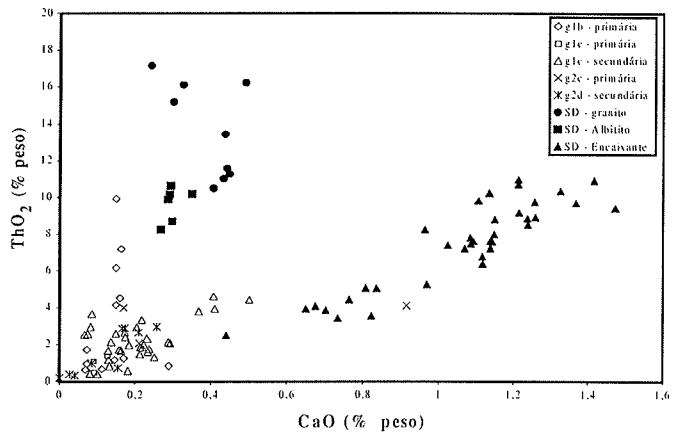


Figura 5 – Variação nos conteúdos de CaO e ThO₂ dos cristais de monazita estudados

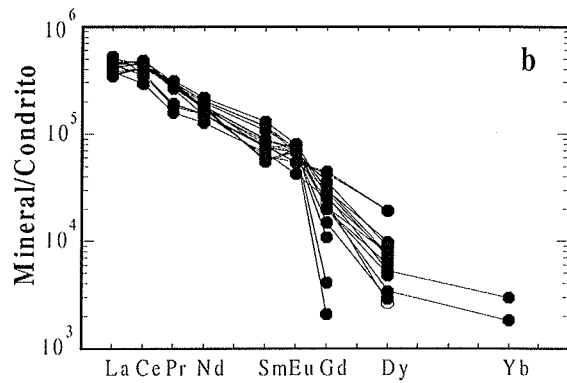
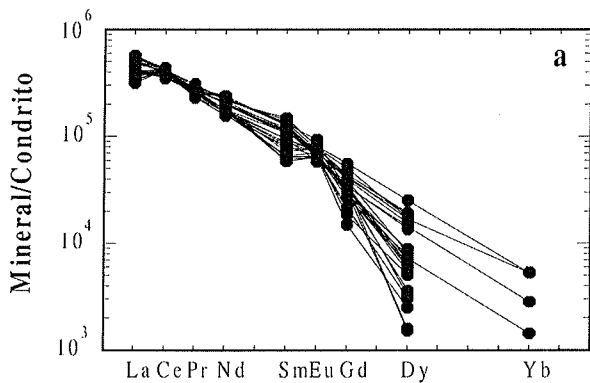
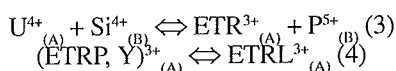


Figura 6 – Padrões de ETR normalizados ao condrito (fatores de normalização de Boynton 1984) de cristais de monazita da SPP. a) monazita da suíte g1; b) monazita da suíte g2.



que relacionam este mineral com brabantita, huttonita, coffinita e xenotima, respectivamente.

Os cristais de monazita estudados apresentam forte correlação negativa entre Si e P (fator de correlação = -0,971), o que mostra substituição de Si \leftrightarrow P no sítio tetraédrico, representada pelas equações (2) e (3). Essas substituições são confirmadas pelo diagrama da figura 8 onde os dados apresentam correlação positiva entre Si e (U+Th), individualizando dois trends, um com (Th+U) : Si = 1,5 : 1 e outro com (Th + U):Si = 1:1. O baixo conteúdo em U dos espécimens estudados (Tabela 1), mostra que a substituição (2) predomina sobre a (3).

No diagrama da figura 9, os dados se dispõem segundo dois trends. Os dados de monazita da encaixante do Maciço Serra Dourada apresentam correlação positiva (fator de correlação = 0,953) e se dispõem próximos ou sobre a linha (Th + U):Ca = 1:1, indicando que a principal substituição na mesma é a que rege a solução sólida monazita-brabantita, ainda que a equação (2) ocorra de forma subordinada.

Conclusões semelhantes são alcançadas mediante o diagrama

da figura 10, no qual a monazita da encaixante greisenizada do Maciço Serra Dourada e alguns dados de monazita do Paraña se situam sobre a linha da solução sólida monazita-brabantita, o que indica que a principal substituição nas mesmas é a (1) embora (2) e (3) também ocorram. Os dados dos demais espécimens do Paraña e monazita do Maciço Serra Dourada localizam-se em posição intermediária entre as linhas das soluções sólidas monazita-brabantita e monazita-huttonita/coffinita, indiativo da presença simultânea das substituições (1), (2) e (3).

Os espécimens estudados apresentam conteúdos apreciáveis de Y_2O_3 e $ETRP_2O_3$ (até 1,07 e 3,5% respectivamente), o que sugere a presença da solução sólida monazita-xenotima, regida pela equação (4), mas a baixa correlação positiva entre ETRL e (ETRP + Y) indica que sua ocorrência é restrita.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES Tanto nos maciços da SPP quanto no Maciço Serra Dourada, a monazita é acessório comum das fácies mais evoluídas e dos greisens, não sendo constatada nas fácies menos evoluídas, onde a apatita, allanita e zircão são os principais acessórios portadores de ETR

Segundo Botelho (1992) há uma diminuição nos conteúdos de Ca, P e ETR, principalmente Ca, durante a evolução magmática

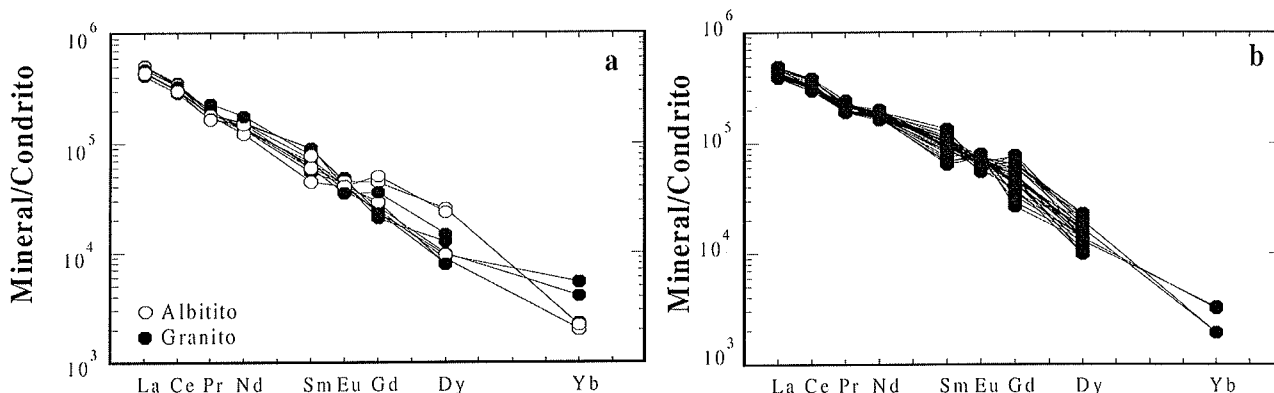


Figura 7 – Padrões de ETR normalizados ao condrito (fatores de normalização de Boynton 1984) de monazita do Maciço Serra Dourada. a) granito e albitito; b) encaixante greisenizada.

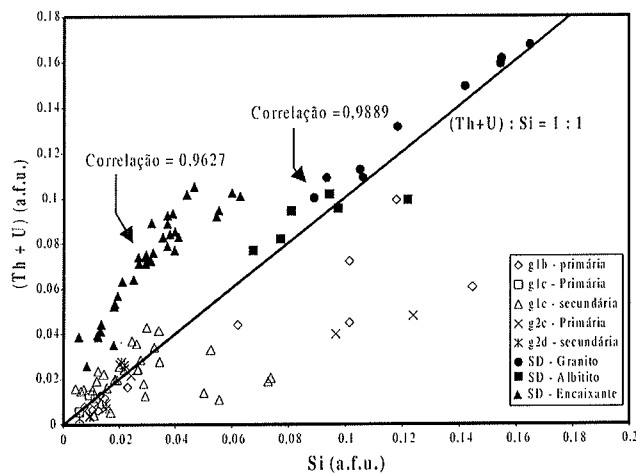


Figura 8 – Diagrama (Th + U) x Si (a.f.u.) que mostra dois trends de correlação: um com razão (Th + U):Si = 1:1 e outro com razão aproximada 1,5:1.

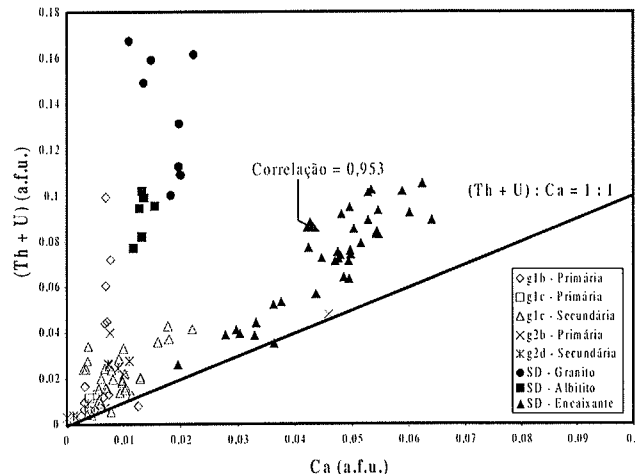


Figura 9 – Diagrama (Th+U) x Ca (a.f.u.) que mostra a importância da substituição (1) nos cristais de monazita da encaixante greisenizada do Maciço Serra Dourada.

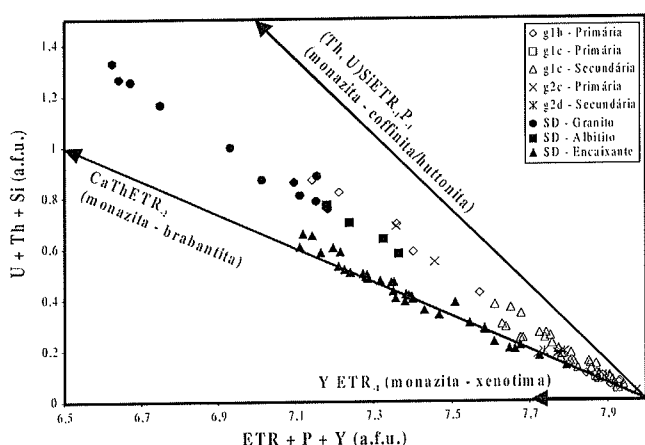


Figura 10 – Diagrama $(U+Th+Si) \times (ETR+P+Y)$ (a.f.u.) (Franz et al. 1996), que mostra a existência da substituição (1) na monazita do Maciço Serra Dourada e das substituições (1) e (2) na das demais ocorrências estudadas.

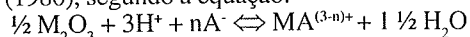
dos maciços estaníferos. Neste processo, aumenta a competição pelo Ca que é incorporado preferencialmente por minerais com os quais apresenta maior afinidade, como plagioclásio e fluorita. Deste modo, há diminuição na quantidade de apatita e allanita com a evolução magmática até o seu desaparecimento nas fácies g1c, g2c e g2d. Nessas fácies, a presença de P e ETR no sistema ocasionou a formação de monazita, a qual passa a ser o principal portador de ETRL nas mesmas.

A apatita e a allanita não são estáveis durante o hidrotermalismo, que as destrói e libera P, Ca e ETR. Por sua maior afinidade com o F, elemento comum nos fluidos hidrotermais associados aos granitos estaníferos de Goiás (Bilal 1991, Botelho 1992, Moura 1993, Teixeira 1998, 2002, Freitas 2000), o Ca precipitou na forma de fluorita, enquanto o P e os ETR como monazita. Assim, mesmo greisens desenvolvidos sobre fácies menos evoluídas apresentam monazita.

A monazita do Maciço Serra Dourada é mais rica em CaO e ThO₂ que a de rochas da SPP e individualiza dois conjuntos com relação à sua química e modo de ocorrência (Fig. 5). A de granitos e granitos hidrotermalizados é mais rica em ThO₂ e mais pobre em CaO que a da encaixante greisenizada. O Th comportou-se como elemento incompatível durante a evolução magmática (Botelho 1992). Assim, a monazita das fácies mais evoluídas do Maciço Serra Dourada se formou a partir de magma rico em Th sendo, portanto, rica neste elemento. Entretanto, outros fatores devem ter contribuído para a incorporação de Th na monazita, pois esta deveria ser mais rica em Th na fácies g1c do que na g1b da SPP, o que não ocorre (Fig. 5). A presença de torita nas fácies

g1c (Teixeira & Botelho 1999) levou à competição pelo Th e à precipitação de monazita mais pobre neste elemento que a da g1b.

A monazita das rochas encaixantes da borda sul do Maciço Serra Dourada se formou pela interação da rocha com fluidos hidrotermais provenientes do granito. Como regra, os ETR são considerados elementos imóveis. Entretanto, sob determinadas condições, eles podem ser móveis. Para haver o transporte dos ETR, o fluido hidrotermal deve ser rico em HCO₃⁻, CO₃²⁻, F, HSO₄⁻ ou SO₄²⁻, favorecendo seu transporte sob a forma de complexos (Kosterin 1959). Outro mecanismo de transporte foi sugerido por Alderton (1980), segundo a equação:



onde M = ETR e A = F, Cl

Segundo este, a maioria dos ETR formaria complexos do tipo (MA₂)⁺ enquanto o La formaria um complexo do tipo MA₃. A presença comum de fluorita e, mais raramente, de fluoretos e fluorcarbonatos de ETR nas rochas alteradas hidrotermalmente das suítes g1 e g2 sugere a presença de F e CO₂ nos fluidos hidrotermais. Esses fluidos, responsáveis pela greisenização da encaixante, provocaram a precipitação de monazita hidrotermal. Devido ao metamorfismo na fácies anfibolito alto na região da SPP (Marini et al. 1984) pode-se argumentar que a monazita da encaixante é metamórfica. Entretanto, a ausência de referências de monazita nas rochas do Grupo Serra da Mesa e da Formação Ticunzal (Marini et al. 1977, 1984, Lacerda Fi-lho et al. 1999, Alvarenga et al. 2000) e a diminuição da quantidade de monazita com a distância do granito desfavorecem esta hipótese. A diferença composicional entre a monazita da encaixante e a de albititos do Maciço Serra Dourada deve-se à composição dos fluidos hidrotermais, da sua maior ou menor capacidade de transportar ETR ou a diferenças composicionais das rochas submetidas ao hidrotermalismo.

Na monazita de granitos da SPP e do Maciço Serra Dourada predomina a solução sólida monazita – huttonita, enquanto na da encaixante greisenizada da borda sul da Serra Dourada predomina a solução sólida monazita – brabantita. Em ambos casos também se observa a presença das soluções sólidas monazita – xenotima e monazita – coffinita, embora de forma subordinada.

O Maciço Serra Dourada apresenta fácies de borda orientadas e gnaissificadas (Macambira 1983, Bilal 1991), freqüentemente confundidas com a encaixante (paragneisse). A diferença química entre a monazita do maciço e da encaixante pode ser usada como meio adicional para separá-los.

Agradecimentos Ao CNPq pelo financiamento à pesquisa (processo 142702/1998-6), aos revisores anônimos da RBG e aos membros da banca de doutorado de L. M. Teixeira pelas sugestões ao texto, e à Nelson Fava e Onésio R. Nunes Filho pelo auxílio na aquisição dos dados de Microsonda Eletrônica.

Referências

- Alderton D.H.M., Pearce J.A., Potts S.P.J. 1980. Rare-earth element mobility during granite alteration: evidence from southwest England. *Ear. Planet. Sci. Let.*, **49**:149–165.
- Alvarenga C.J.S., Botelho N.F., Dardenne M.A., Campos J.E.G., Martins F.A.L., Menezes P.R., Moura M.A. 2000. Magmatic and stratigraphic evolution of a Paleoproterozoic syn-rift to post-rift basin: example of the Ará Basin, Brazil. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, Abstracts, CD-ROM.
- Åmli R. & Griffin W.L. 1975. Microprobe analysis of REE minerals using empirical correction factors. *Amer. Mineral.*, **60**:599–606.
- Bea F. 1996. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths, implications for the chemistry of crustal melts. *Jour. Petrol.*, **37**: 521–552.
- Bea F., Pereira M.D., Corretge L.G., Fershtater G.B. 1994. Differentiation of strong peraluminous, perphosphorous granites: The Pedrobernardo pluton, central Spain. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **58**:2609–2627.
- Bilal E. 1991. *Etude de deux massifs de la province stannifère de l'Etat de Goiás (Brésil) et des formations metasomatiques associées aux minéralisations en Sn et Be*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, Thèse de Doctorat, 360p.
- Botelho N.F. 1984. *O granito Pedra Branca (Goiás) e as mineralizações de estanho associadas*. Instituto de Geociências,

- Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 258p.
- Botelho N.F. 1992. *Les ensembles granitiques subalcalins a peralumineux mineralisés en Sn et In de la sous-province Paranã, état de Goiás, Brésil*. Université de Paris VI, Paris, Thèse de Doctorat, 344p.
- Botelho N.F. & Pimentel M.M. 1993. Geocronologia Rb-Sr das fases intrusivas do maciço granítico da Pedra Branca, Província Estanífera de Goiás. In: SBGq, Congresso Brasileiro de Geoquímica, 4, Brasília, *Resumos Expandidos*, pp.: 253–254.
- Bowie S.H.U. & Horne J.E.T. 1953. Cheralite, a new mineral of the monazite group. *Mineral. Mag.*, **30**:93–99.
- Boyton W.V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (ed.) *Rare Earth Element Geochemistry*, London, Elsevier, pp.: 63–114.
- Casillas R., Nagy G., Pantó G., Brángle J., Fórizs I. 1995. Occurrence of Th, U, Y, Zr, and REE-bearing accessory minerals in late-Variscan granitic rocks from the Sierra de Guadarrama (Spain). *Europ. Jour. Mineral.*, **7**:989–1006.
- Chang L., Howie R.A., Zussman J. 1996. *Rock forming minerals - volume 5B - Non Silicates - sulphates, carbonates, phosphates and halides*. 2 ed. London, Longman Group Limited, 383p.
- Charoy B. & Pollard P.J. 1989. Albite-rich, silica-depleted metasomatic rocks at Emuford, northeast Queensland: Mineralogical, geochemical, and fluid inclusion constraints on hydrothermal evolution and tin mineralization. *Ec. Geol.* **84**:1850–1874.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1997. *Rock Forming Minerals - Volume 1B - Disilicates and Ring Silicates*, London, The Geological Society, 629p.
- Della Ventura G., Mottana A., Parodig C., Raudsep M., Bella Treccia F., Caprilli E., Rossi P., Fiori S. 1996. Monazite-huttonite solid-solutions from the Vico Volcanic Complex, Latium, Italy. *Mineral. Mag.*, **60**:751–758.
- Demartin F., Pilati T., Diella V., Donselli S., Gramaccioli C.M. 1991. Alpine monazite: further data. *Can. Mineral.*, **29**:61–67
- Föster H.J. 1998 The chemical composition of REE-Y-Th-U rich accessory minerals in peraluminous granite of the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany, Part I: The monazite – (Ce) – brabantite solid solution series. *Am. Mineral.*, **83**:259–272.
- Franz G., Amdrehs S.G., Rhede D. 1996. Crystal chemistry of monazite and xenotime from Saxothuringian-Moldanubian metapelites, NE Bavaria, Germany. *Europ. J. Mineral.*, **8**:1097–1118.
- Freitas M.E. 2000. *A evolução dos greisens e mineralização estanífera no Morro do Laranjinha – Maciço Granítico Mangabeira – Goiás*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 215p.
- Hinton R.W. & Paterson B.A. 1994. Crystallisation history of granitic magma; evidence from trace element zoning. *Mineral. Mag.*, **58A**:416–417.
- Kosterin A.V. 1959. The possible modes of transport of the rare-earth by hydrothermal solutions. *Geochemistry*, **4**:381–387.
- Kucha H. 1980. Continuity in the monazite - huttonite series. *Mineral. Mag.*, **43**:1031–1034.
- Lacerda Filho J.V., Ribeiro P.S.E., Ribeiro Filho W., Dardenne M.A. (coord) 1999. *Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal – Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal*. CPRM.
- Macambira M.J.B. 1983 *Ambiente geológico e mineralizações associadas ao granito Serra Dourada (extremidade meridional) – Goiás*. Universidade Federal do Pará, Pará, Tese de Doutorado, 132p.
- Marini O.J., Fuck R.A., Dardenne M.A., Faria A. 1977. Contribuição à geologia do Pré-Cambriano da porção central de Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, **7**:304–324
- Marini O.J., Fuck R.A., Dardenne M.A., Danni J.C.M. 1984. Província Tocantins – setores central e sudeste. In: F. F. M. Almeida Y. Hassui (ed.) *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda. 205–264.
- Marini O.J. & Botelho N.F. 1986 A província de granitos estaníferos de Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, **16**:119–131.
- Maruéjol P., Cuney M., Turpin L. 1990. Magmatic and hydrothermal REE fractionation in the Xihuashan granites (SE China). *Contr. Min. Petrol.*, **104**:668–680.
- Montel J.M. 1993. A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas. *Chem. Geol.* **110**:127–146.
- Moura M.A. 1993. *A zona greisenizada principal do maciço estanífero Mangabeira (GO): geologia, petrologia e ocorrência de índio*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, Dissertação de Mestrado. 320p.
- Ni Y., Hughes J.M., Mariano A.N. 1995. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures. *Am. Mineral.*, **80**:21–26.
- Pabst A. 1952. The metamict state. *Am. Mineral.*, **37**: 137–157.
- Padilha J.L. & Laguna A.M.G. 1984. Geologia dos granitos da Pedra Branca, Mocambo, Mangabeira e Serra do Mendes - Goiás. In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro Oeste, 1, Goiânia, *Anais*, **1**:622–643.
- Pimentel M.M., Heamsn L., Fuck R.A., Marini O.J. 1991 U-Pb zircon geochronology of precambrian tin-bearing continental-type acid magmatism in central Brazil. *Precamb. Res.*, **52**:321–335.
- Pimentel M.M., Fuck R.A., Botelho N.F. 1999. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, **46**:463–483.
- Rosenblum S. & Fleischer M. 1996 The distribution of rare-earth elements in minerals of the monazite family. *USGS, Bulletin* 2140.
- Rossi P., Andrade G.F., Cocherie A. 1992. The 1,58Ga A type granite of Serra da Mesa (GO): an example of “NYF” fertile granite pegmatite. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, *Boletim de Resumos Expandidos*, pp.: 389–390.
- Teixeira L.M. 1998. *Caracterização dos minerais portadores de terras raras em granitos da Subprovíncia Estanífera Paranã – Goiás*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, Dissertação de Mestrado. 174p.
- Teixeira L.M. 2002 *Caracterização de minerais portadores de Terras Raras e sua aplicação à petrologia e geocronologia de granitos das Subprovíncias Tocantins e Paranã – Goiás*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 356p.
- Teixeira L.M. & Botelho N.F. 1999. Comportamento dos elementos terras raras pesadas em zircão, xenotime e torita de granitos e greisens da subprovíncia estanífera Paranã – Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, **29**:549–556.
- Ward C.D., McArthur J., Walsh J.N. 1992. Rare earth element behaviour during evolution and alteration of the Dartmoor Granite, SW England. *Jour. Petrol.*, **33**:785–815.
- Wark D.A. & Miller C.F. 1993. Accessory mineral behaviour during differentiation of a granite suite: monazite, xenotime and zircon in the Sweetwater Wash pluton, southeastern California, USA. *Chem. Geol.*, **110**:46–67.

Manuscrito A-1255

Recebido em 10 de setembro de 2001

Revisão dos autores em 18 de agosto de 2002

Revisão aceita em 22 de agosto de 2002