

## Datações U-Pb Convencional Versus SHRIMP do Maciço Estanífero Santa Bárbara, Suíte Granitos Últimos de Rondônia, Brasil

Irena Sparrenberger<sup>1</sup>, Jorge Silva Bettencourt<sup>2</sup>, Richard M. Tosdal<sup>3</sup>, Joseph L. Wooden<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia - Instituto de Geociências - USP  
Rua do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BRA

<sup>2</sup>Departamento de Mineralogia e Geotectônica - Instituto de Geociências - USP, São Paulo, SP, BRA

<sup>3</sup>Department of Earth & Ocean Sciences - University of British Columbia, Vancouver, CAN

<sup>4</sup>USGS-SUMAC, Ion Probe Lab. - Stanford University, Stanford, USA

**Palavras-chave:** SHRIMP, granitos estaníferos, Província Estanífera de Rondônia, Cráton Amazônico.

### RESUMO

O Maciço Granítico Santa Bárbara é parte da Suíte Granitos Últimos de Rondônia (998 - 974 Ma), e integra a Província Estanífera de Rondônia (SW do Cráton Amazônico). Compreende três unidades de granitos altamente fracionados, metaluminosos a peraluminosos, de afinidade geoquímica com granitos do tipo A e intraplaca. A mineralização estanífera está associada com a unidade tardia. As unidades facies Serra do Cícero, precoce, e facies Serra Azul, tardia, foram datadas por U-Pb em monazita em  $993 \pm 5$  Ma e  $989 \pm 13$  Ma, respectivamente. A datação U-Pb convencional de zircão, entretanto, demonstrou perturbação isotópica e revelou importantes componentes herdados das unidades em questão, sendo inadequada para a definição da idade de cristalização desses granitos. Datações via SHRIMP do zircão da unidade associação de facies Santa Bárbara forneceram média ponderada das idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de  $978 \pm 13$  Ma. A alta complexidade textural dos cristais de zircão da associação de facies Santa Bárbara, seus teores variáveis de U, Th e Pb, além da presença comum de populações de zircão com núcleos herdados, desencorajam o uso da datação U-Pb convencional em multigrão em granitos similares. As idades-modelo Sm-Nd e os valores de  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  revelam dados isotópicos anômalos, confirmando a complexidade do comportamento dos sistemas isotópicos nestes granitos altamente fracionados. Diante desse cenário, os autores consideram os métodos U-Pb em zircão via SHRIMP e U-Pb convencional em monazita como mais adequados para a estimativa da idade de cristalização em sistemas graníticos mineralizados na Província Estanífera de Rondônia.

**Keywords:** SHRIMP, tin granites, Rondônia Tin Province, Amazonian Craton.

### ABSTRACT

The Santa Bárbara Granite Massif is part of the Younger Granites of Rondônia (998 - 974 Ma) and is included in the Rondônia Tin Province (SW Amazonian Craton). It comprises three highly fractionated metaluminous to peraluminous within-plate A-type granite units emplaced in older medium-grade metamorphic rocks. Sn-mineralization is closely associated with the late-stage unit. U-Pb monazite conventional dating of the early-stage Serra do Cícero facies and late-stage Serra Azul facies yielded ages of  $993 \pm 5$  Ma and  $989 \pm 13$  Ma, respectively. Conventional multigrain U-Pb isotope analyses of zircon demonstrate isotopic disturbance (discordance) and the preservation of inherited older zircons of several different ages and thus yield little about the ages of Sn-granite magmatism. SHRIMP U-Pb ages for the Santa Bárbara facies association yielded a  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  weighted-mean age of  $978 \pm 13$  Ma. The textural complexity of the zircon crystals of the Santa Bárbara facies association, the variable concentrations of U, Th and Pb, as well as the mixed inheritance of zircon populations are major obstacles to using conventional multigrain U-Pb isotopic analyses. Sm-Nd model ages and  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  values reveal anomalous isotopic data, attesting to the complex isotopic behaviour within these highly fractionated granites. Thus, SHRIMP U-Pb zircon and conventional U-Pb monazite dating methods are the most appropriate to constrain the crystallization age of the Sn-bearing granite systems in the Rondônia Tin Province.

## INTRODUÇÃO

O zircão é uma fase mineral acessória tradicionalmente usada na datação U-Pb de granitos. Sua utilidade reside na alta estabilidade química observada frente a processos geológicos em estágio *subsolidus* e ao intemperismo.

No caso estudado, as rochas portadoras de zircão são granitos altamente fracionados, ricos em voláteis e, em alguns casos, hospedeiros de minério de elementos raros. Boa parte dos cristais do mineral são turvos, com feições morfológicas internas complexas e teores de U, Th e Pb altamente variáveis.

O método convencional de datação U-Pb em zircão, utilizado em duas das três unidades do Maciço Granítico Santa Bárbara, mostrou-se inadequado para a definição da idade de cristalização dos granitos em virtude do alto grau de discordância das análises, que pode ser atribuído a distúrbios do sistema U-Th-Pb causados por interação rocha-fluido em estágio tardi à pós-magmático, e da frequência de zircão herdado.

Diante desse cenário, a intenção dos autores é de confrontar os métodos clássicos de datação U-Pb em zircão (espectrometria de massa por ionização térmica em multigrão) com o SHRIMP neste granito estanífero, buscando a definição da abordagem mais adequada à problemática da datação de rochas similares.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

O Maciço Granítico Santa Bárbara localiza-se no norte do estado de Rondônia, margem sudoeste do Cráton Amazônico, alojado em rochas da Província Geocronológica Rio Negro-Juruena (Cordani *et al.*, 1979; Teixeira *et al.*, 1989; Tassinari, 1996) (Fig. 1a). Integra a Província Estanífera de Rondônia, cujo embasamento é constituído predominantemente pelos granitóides metamorfizados nas facies anfíbolito e granulito do Complexo Jamari (Isotta *et al.*, 1978).

Cinco associações litológicas ocorrem no embasamento da porção centro-leste da Província Estanífera de Rondônia (Payolla *et al.*, 2001b; 2002):

1. gnaisses tonalíticos (1,75 Ga;  $\epsilon_{Nd}(T) -1,5$  a  $+0,1$ ;  $T_{DM} 2,2$  a  $2,1$  Ga);
2. granulitos enderbíticos (1,73 Ga;  $\epsilon_{Nd}(T) -0,6$  a  $+0,1$ ;  $T_{DM} 2,1$  Ga);
3. paragnaisses (idade incerta;  $T_{DM} 2,2$  a  $2,1$  Ga);

4. *augen*-gnaisses graníticos e charnockíticos (1,57 a 1,53 Ga;  $\epsilon_{Nd}(T) +0,6$  a  $+2,0$ ;  $T_{DM} 1,9$  a  $1,8$  Ga);

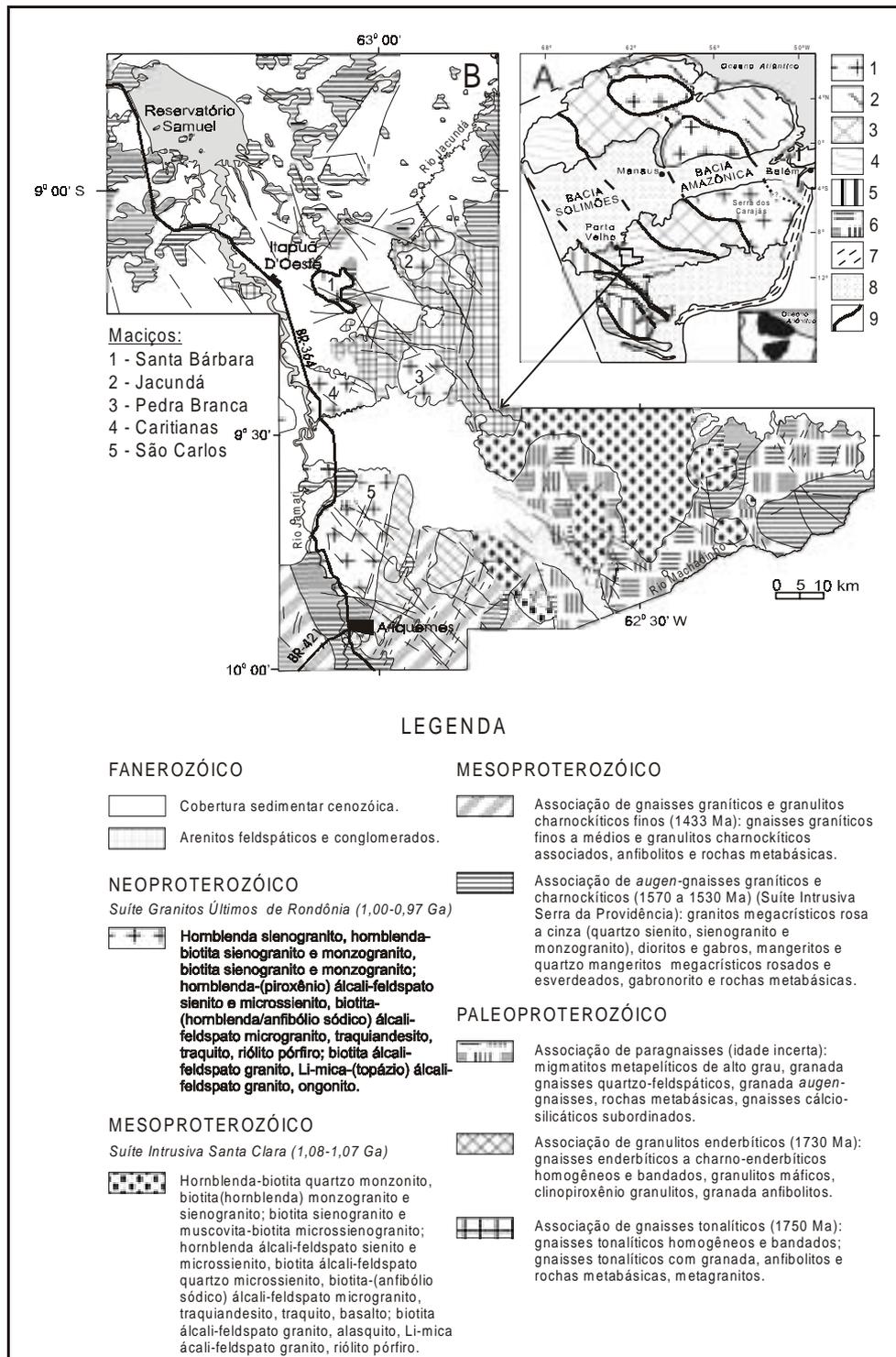
5. gnaisses graníticos e granulitos charnockíticos finos (1,43 - 1,42 Ga;  $\epsilon_{Nd}(T) +0,7$  a  $+1,2$ ;  $T_{DM} 1,8$  a  $1,7$  Ga) (Fig. 1b).

As duas primeiras associações apresentam afinidade geoquímica cálcio-alcálica e constituem produtos de ambiente de margem continental do tipo andino. A associação de paragnaisses tem seu intervalo de deposição limitado entre 1,67 e 1,57 Ga, com contribuição significativa da crosta da Província Geocronológica Ventuari-Tapajós, definida por Tassinari (1996). Essas três associações estão relacionadas ao desenvolvimento da Província Rio Negro-Juruena, e representam a crosta mais antiga da região (Payolla *et al.*, 2002).

Os *augen*-gnaisses graníticos e charnockíticos têm afinidades geoquímicas com granitos do tipo A, intraplaca. São derivados de mistura de magma do manto empobrecido com crosta mais antiga (Payolla *et al.*, 2001) e correlacionados à Suíte Intrusiva Serra da Providência (Bettencourt *et al.*, 1999), uma associação MCG (de AMCG: anortosito-mangerito-charnockito-granito rapakivi; Emslie, 1991) (Rizzotto *et al.*, 1996) contemporânea ao Orógeno Cachoeirinha, reconhecido no estado do Mato Grosso (Tassinari *et al.*, 2000; Gerales *et al.*, 2001).

Os gnaisses graníticos e granulitos charnockíticos finos da Suíte Intrusiva Rio Crespo (Payolla *et al.*, 2001a, b), são o primeiro registro de magmatismo do tipo A, intraplaca, no norte de Rondônia no intervalo de 1,43 - 1,42 Ga. Constituem expressões reflexas distais (*inboard*) dos processos acrescionários de margem continental reconhecidos por Gerales *et al.* (2001) no Mato Grosso, e seus protólitos ter-se-iam originado da mistura de material juvenil e crosta antiga (Payolla *et al.*, 2002).

A Província Estanífera de Rondônia compreende ainda sete suítes de granitos rapakivi e rochas máficas associadas, geradas durante seis episódios magmáticos entre 1,6 e 0,9 Ga (Bettencourt *et al.*, 1997; 1999). Na sua porção centro-leste, ocorrem rochas da Suíte Intrusiva Santa Clara e da Suíte Granitos Últimos de Rondônia. A primeira tem como encaixantes as rochas das associações dos gnaisses tonalíticos, dos paragnaisses, dos *augen*-gnaisses graníticos e charnockíticos, e dos gnaisses graníticos e granulitos charnockíticos finos. A Suíte Granitos Últimos de Rondônia é intrusiva em todas as associações litológicas presentes na porção centro-leste da Província Estanífera de Rondônia com exceção daquela dos paragnaisses (Payolla *et al.*, 2002). Ambas suítes constituem magmatismo *inboard* relacionado ao estágio colisional



**Figura 1. A)** Mapa geológico esquemático do Cráton Amazônico. 1) Província Amazônia Central (> 2,3 Ga); 2) Província Maroni-Itacaiúnas (2,2 - 1,95 Ga); 3) Província Ventuari-Tapajós (1,95 - 1,8 Ga); 4) Província Rio Negro-Juruena (1,8 - 1,55 Ga); 5) Província Rondoniana-San Ignacio (1,5 - 1,3 Ga); 6) Província Sunsás (1,25 - 1,0 Ga); 7) Cinturão móvel neoproterozóico; 8) Rochas sedimentares fanerozóicas; 9) Limites de província. Simplificado de Tassinari *et al.* (2000). **B)** Mapa de associações litológicas da porção centro-leste da Província Estanífera de Rondônia. Simplificado de Payolla *et al.* (2002).

da Orogênese Sunsás, de Tassinari *et al.* (2000), e hospedam minério primário de estanho (Bettencourt *et al.*, 1999).

As rochas dessas duas suítes apresentam características geoquímicas de granitos do tipo A, intraplaca. Recentemente, foram subdivididas em dois subgrupos (Leite Júnior *et al.*, 2000; 2001), a saber: subgrupo **precoce**, de caráter metaluminoso a levemente peraluminoso; e **tardio**, compreendendo rochas metaluminosas, peralcalinas e peraluminosas. O subgrupo tardio peraluminoso hospeda a mineralização primária de Sn, W, Ta, Nb, Zn, Cu e Pb.

## GEOLOGIA DO MACIÇO GRANÍTICO SANTA BÁRBARA

O Maciço Granítico Santa Bárbara está encaixado em granitos cinza que, juntamente com granitóides rosas e charnockitóides, compõem a associação dos *augen*-gnaiesses graníticos e charnockíticos (Fig. 1b). Os granitos cinza predominam no setor norte da região centro-leste da Província Estanífera de Rondônia, e compreendem hornblenda e/ou biotita sienogranitos e monzogranitos com megacristais que apresentam, localmente, encraves ou enxames de diques máficos e de rochas híbridas. Geralmente indeformados, podem exibir foliação magmática ou estrutura S-C desenvolvida em zonas de cisalhamento. Sua idade de cristalização é estimada em 1550 - 1540 Ma (Payolla *et al.*, 2002).

O maciço consiste de *stock* semicircular com cerca de 7 km de diâmetro, localizado no Distrito Mineiro de Santa Bárbara. Apresenta três unidades magmáticas *subsolvus*: facies Serra do Cícero, facies Serra Azul e associação de facies Santa Bárbara (Fig. 2). A facies Serra do Cícero faz parte do subgrupo precoce e compreende sienogranito rosa porfirítico de matriz fina ou média, com textura wiborgítica e caráter metaluminoso. A facies Serra Azul é composta por albita-microclínio granito rosa inequigranular de granulação média e natureza peraluminosa. Duas facies de albita-microclínio granito de contato transicional fazem parte da associação de facies Santa Bárbara: uma rosa porfirítica de matriz média com textura piterlítica (facies Santa Bárbara média); e outra, restrita à porção superior (cúpula) da unidade, de granito equigranular ou microporfirítico rosa-esbranquiçado a branco, de matriz fina (facies Santa Bárbara fina), todos peraluminosos. As facies Serra Azul e Santa Bárbara são enquadradas no subgrupo tardio peraluminoso (Sparrenberger & Bettencourt, 2002a).

Na facies Serra do Cícero é reconhecido, raramente,

oligoclásio, enquanto que nas demais unidades o plagioclásio é de composição albítica. Em todas elas, o mineral máfico presente é a siderofilita com teores decrescentes de ferro e crescentes de lítio e flúor da facies Serra do Cícero para a associação de facies Santa Bárbara, e ocorrem fluorita e topázio magmáticos como minerais acessórios. A monazita, mais abundante na facies Serra do Cícero, o zircão, a xenotima (rara, na facies Serra do Cícero), e a cassiterita (rara, na facies Santa Bárbara média) são outras fases acessórias (Sparrenberger & Bettencourt, 2002a).

Alteração hidrotermal pervasiva e pervasiva fissural afeta as rochas da associação de facies Santa Bárbara. A primeira compreende metassomatismo ácido (greisenização) e metassomatismo alcalino (feldspatização sódica). Corpos de topázio-siderofilita-quartzo *greisens* horizontais ou de baixo mergulho, com grande extensão lateral, ocorrem como produtos do metassomatismo ácido, e configuram modelo de *greisens* acamadados. Granitos albitizados, espacialmente associados aos *greisens*, são produtos do metassomatismo alcalino.

A alteração pervasiva fissural, representada por greisenização, silicificação, fengitização e argilização compreende *stockwork* de topázio-siderofilita-quartzo *greisen* e de caulinita, além de veios de quartzo-cassiterita, veios de fengita e veios de quartzo estéreis, alojados principalmente na facies Santa Bárbara fina.

O minério estanífero está restrito à região de cerca de 500 m x 150 m em planta, e ocorre principalmente em corpos de topázio-siderofilita-quartzo *greisen*, mas também em veios de *greisen* e de quartzo-cassiterita. Formou-se no intervalo de 500 a 400°C, conforme indicam dados isotópicos de oxigênio em quartzo e cassiterita (Sparrenberger & Bettencourt, 2000; 2002a, b).

As primeiras datações dos granitos estaníferos de Rondônia definiram a idade de cristalização do Granito Jacundá como  $940 \pm 20$  Ma (Priem *et al.*, 1966), e estabeleceram a época da intrusão de três corpos graníticos em  $980 \pm 20$  Ma por meio de isócrona de referência Rb-Sr e datações K-Ar em mica (Priem *et al.*, 1971). Ainda utilizando isócrona de referência Rb-Sr, Priem *et al.* (1989) obtiveram uma idade de  $956 \pm 9$  Ma para cinco intrusões graníticas que integram a Suíte Granitos Últimos de Rondônia.

Os maciços Pedra Branca, Caritianas e São Carlos (isócrona de referência), e Massangana têm idades isocronicas Rb-Sr de  $954 \pm 20$ ,  $960 \pm 6$  e  $960 \pm 27$  Ma (Bettencourt, dados inéditos), respectivamente, porém a definição mais precisa do episódio de intrusão dos Granitos Últimos de Rondônia, entre 998 e 974 Ma, foi obtida via datações U-Pb em zircão para os maciços Pedra Branca

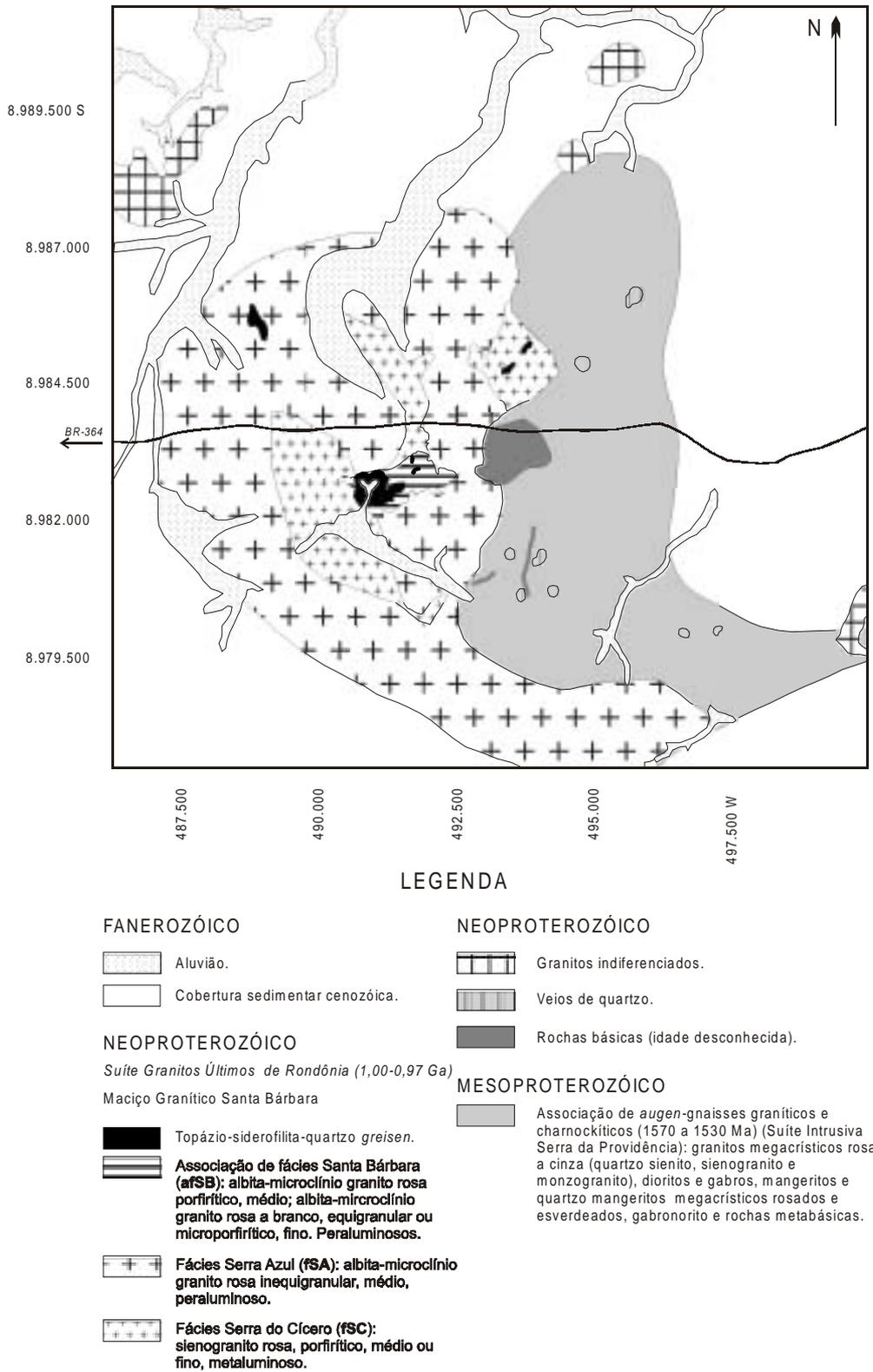


Figura 2. Mapa geológico do Maciço Granítico Santa Bárbara. Modificado de Frank (1990), CESBRA (1994) e Payolla *et al.* (2002).

(998 ± 5 Ma), São Carlos (974 ± 6 Ma) e Massangana (991 ± 14 Ma) (Bettencourt *et al.*, 1999).

A idade da mineralização estanífera no Maciço Granítico Santa Bárbara, estimada por datação K-Ar de mica de *greisen*, é de 961 ± 19 Ma (Leite Júnior *et al.*, 2001). A datação da mineralização de Bom Futuro em 969 ± 27 Ma pelo mesmo método levou Leite Júnior *et al.* (2001) a concluir que esta ocorreu imediatamente após a cristalização dos granitos tardios peraluminosos da Suíte Granitos Últimos de Rondônia (974 Ma).

## MÉTODOS ANALÍTICOS

### Sistema U-Pb

#### *Separação mineral*

A separação prévia de zircão das três amostras datadas nesta pesquisa foi feita no Laboratório de Preparação de Amostras Geológicas e Pedológicas (LAPEGE) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (IGCE-UNESP), Campus Rio Claro, conforme procedimentos descritos em Galembeck (1997), que envolvem: britagem, peneiramento, separação gravimétrica em bateador mecânico, separação de minerais magnéticos com auxílio de ímã e de minerais paramagnéticos com Separador Isodinâmico de Frantz, separação das frações leve e pesada com bromofórmio e nova classificação granulométrica, com minipeneiras.

A separação foi concluída no Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGC-USP). Constou de uma etapa adicional de separação gravimétrica com líquidos densos e da separação do concentrado em frações magnéticas no Separador Isodinâmico de Frantz, que compreendeu uma purificação inicial para separação de xenotima e monazita conforme Hutchinson (1974, pg. 119), seguida da separação em frações conforme o método de Krogh (1982). Finalmente, selecionaram-se os melhores cristais com lupa binocular.

A escassez de zircão na facies Santa Bárbara fina foi fator proibitivo da utilização do método da espectrometria de massa por ionização térmica para sua datação U-Pb. Procedeu-se então à catação, com lupa binocular, de todos os cristais de zircão presentes no concentrado, num

total de cerca de 90, para datação pelo método SHRIMP-RG.

Adicionalmente, selecionou-se monazita das três unidades do maciço.

#### *Análises por Espectrometria de Massa por Ionização Térmica*

Executaram-se as análises U-Pb em zircão e monazita por espectrometria de massa por ionização térmica (TIMS) no CPGeo, conforme os procedimentos de Krogh (1973) e Corfu & Stott (1986), sintetizados em Basei *et al.* (1995).

A determinação das composições isotópicas foi feita em espectrômetro de massa de fonte sólida Finnigan MAT 262.

Os resultados finais das análises foram calculados e lançados nos diagramas com auxílio do programa ISOPLOT/Ex, versão 2.10, de Ludwig (1999), observando-se as constantes recomendadas pela IUGS (Steiger & Jäger, 1977). Os erros das contagens e dos interceptos com a concórdia são dados em  $2\sigma$ .

#### *Análises por SHRIMP-RG*

As datações U-Pb em zircão da facies Santa Bárbara fina pelo método SHRIMP-RG foram executadas no *Stanford USGS Micro Analysis Center* (SUMAC), na Universidade de Stanford, Califórnia, Estados Unidos da América, por Jorge Silva Bettencourt, Richard. M. Tosdal e Joseph L. Wooden.

Os cristais de zircão foram montados em seções circulares de epóxi com 2,54 cm de diâmetro e 6 mm de espessura, polidas em ambas as faces e metalizadas com 10 nm de ouro naquela onde é feita a leitura. Obtiveram-se imagens de catodoluminescência e de microscópio petrográfico em luz transmitida e refletida, previamente à cobertura, para a caracterização dos cristais e escolha dos pontos adequados para análises.

O equipamento utilizado foi o SHRIMP-RG (*Sensitive High Resolution Ion Micro Probe – Reverse Geometry*) e os procedimentos seguiram os mesmos preconizados em Compston *et al.* (1984) e Williams (1997). Os padrões de zircão usados para a medição das concentrações e das razões isotópicas foram o SL-13 e o AS-57. Os erros das contagens são absolutos e dados em  $1\sigma$ , enquanto que aqueles das idades calculadas são em  $2\sigma$ .

Os resultados finais das análises foram calculados e lançados em diagramas com auxílio do programa ISOPLOT/Ex, versão 2.10, de Ludwig (1999), observando-se as constantes recomendadas pela IUGS (Steiger & Jäger, 1977).

## Sistema Sm-Nd

Efetuararam-se análises Sm-Nd em rocha total no Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, segundo os procedimentos descritos em Gioia & Pimentel (2000). Os materiais utilizados foram as mesmas alíquotas de rochas preparadas para análises litogeoquímicas, na granulacão  $\leq 0,105$  mm (150#, Tyler).

As razões isotópicas foram medidas em espectrômetro de massa Finnigan MAT 262 com multicoletor no modo estático. As reprodutibilidades das razões Sm/Nd e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  são melhores do que  $\pm 0,05\%$  ( $1\sigma$ ) e  $\pm 0,000005$  ( $1\sigma$ ), respectivamente, com base em análises repetidas dos padrões internacionais de rochas BCR-1 e BHVO-1. As razões  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  foram normalizadas para  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  de 0,7219 (O'Nions *et al.*, 1977). Os valores atuais do CHUR usados nos cálculos de  $\epsilon_{\text{Nd}}$  foram  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  de 0,1967 e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  de 0,512638 (Wasserburg *et al.*, 1981). Os valores do MORB utilizados no cálculo das idades-modelo foram  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  de 0,513114 e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  de 0,222 (Michard *et al.*, 1985).

A constante de decaimento do  $^{147}\text{Sm}$  empregada é aquela recomendada por Lugmair & Marti (1978). O cálculo das idades foi efetuado conforme o modelo do Manto Empobrecido de DePaolo (1981).

## RESULTADOS

### Método U-Pb Convencional

Obtiveram-se datações inéditas das facies Serra do Cícero (AM - 52B),  $993 \pm 5$  Ma, e Serra Azul (AM - 53B),  $989 \pm 13$  Ma, por U-Pb convencional em monazita (Fig. 3a e b). Os resultados analíticos estão ilustrados na Tabela 1.

Inicialmente, dataram-se as mesmas facies por U-Pb em zircão (Tabela 2). No primeiro caso, obtiveram-se três pontos analíticos discordantes (Fig. 3a). Um deles, que ocorre isolado, é interpretado como zircão que perdeu chumbo radiogênico, sendo sua idade mínima  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  cerca

de 150 m.a. mais jovem do que o dado fornecido pela datação da monazita da mesma rocha. Os outros dois pontos, entretanto, ocorrem à direita do primeiro, e indicam um componente herdado significativo nas duas frações em questão. Com efeito, suas idades mínimas  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  são de 1979 e 1993 Ma.

Para a facies Serra Azul, ambos os pontos analíticos são discordantes e desalinhados. Um deles localiza-se próximo ao ponto da monazita e tem idade mínima  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  razoavelmente compatível (958 Ma), enquanto que o outro ocorre deslocado para a direita, o que sugere herança a partir de um protólito cuja idade mínima  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  é de cerca de 1617 Ma (Fig. 3b).

### Método SHRIMP-RG

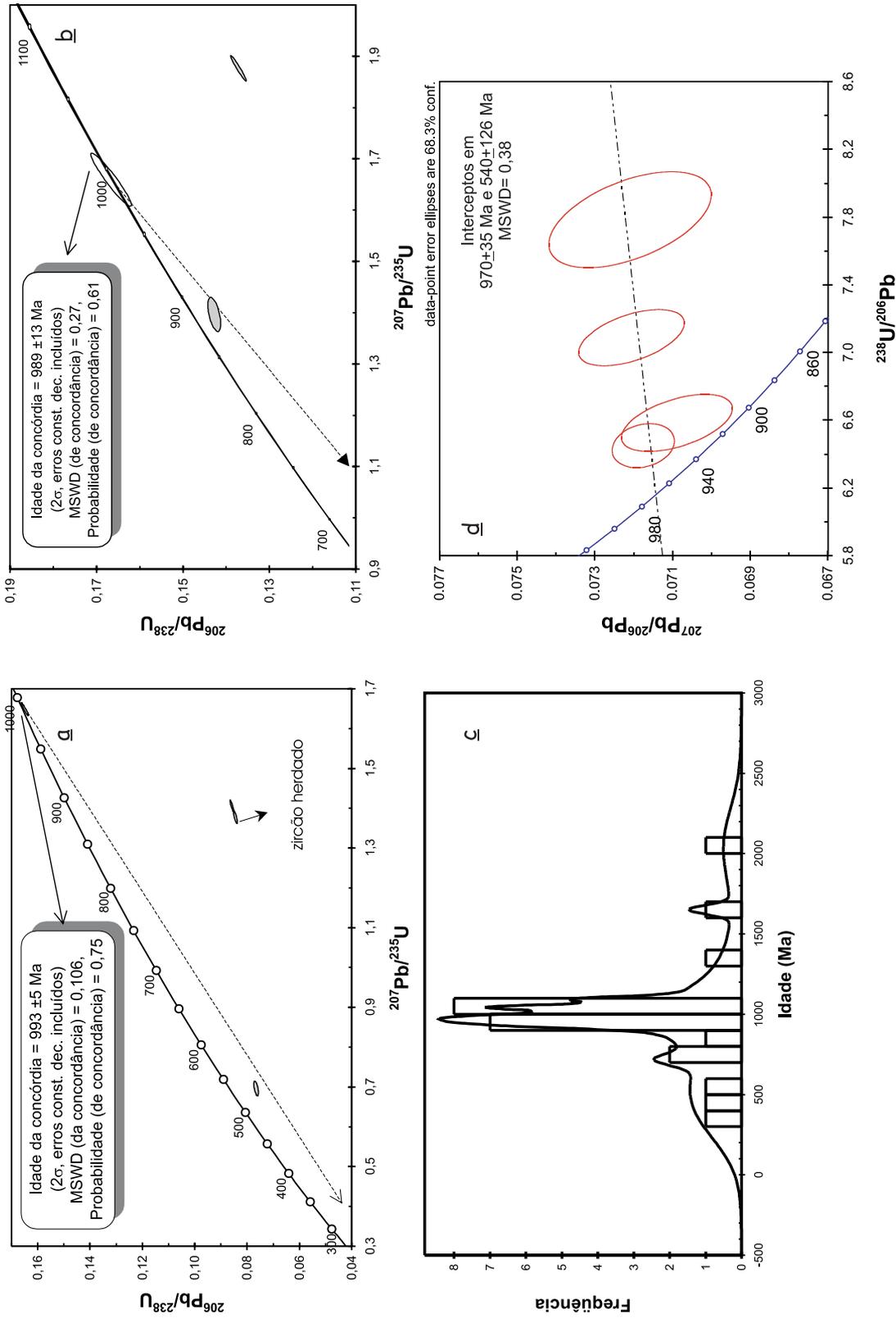
Analisaram-se 24 pontos em diferentes cristais de zircão da facies Santa Bárbara fina (AM - 145) por SHRIMP-RG (Tabela 3). A curva de probabilidade acumulada desses dados indica a existência de pelo menos quatro populações de idades da ordem de 1660, 1045, 970 e 735 Ma (Fig. 3c).

Dezesseis análises foram descartadas para efeito da definição da idade dessas populações com base em uma ou mais das seguintes razões:

- a. discordância inversa nos diagramas Concórdia (Wetherill, 1956) e de Tera & Wasserburg (1972) (pontos 3, 6, 8, 10, 12, 19 e 23);
- b. conteúdos de U maiores que 1000 ppm (pontos 2, 3, 4, 6, 10, 11, 12, 17, 19 e 23);
- c. altos conteúdos de  $^{204}\text{Pb}$ ;
- d. erros elevados das idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

Das oito análises restantes, quatro são representativas da idade da facies Santa Bárbara fina (Fig. 3d), e correspondem ao pico próximo dos 970 Ma na curva de probabilidade acumulada. A média das idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  dessas quatro análises, ponderada pelos seus respectivos erros, é de  $978 \pm 13$  Ma, e concorda, dentro dos intervalos dos erros, com as idades U-Pb em zircão (TIMS) para as facies Serra do Cícero e Serra Azul.

Das outras três populações identificadas, a mais antiga é representada pelos pontos 1 e 15, para os quais são admitidas as idades mínimas de  $1651 \pm 28$  e  $2067 \pm 227$  Ma, respectivamente. O ponto 20 trata-se de núcleo herdado



**Figura 3.** a) Diagrama Concórdia para a amostra AM - 52B (facies Serra do Cícero) mostrando o ponto analítico relativo à datação U-Pb da monazita (elipse incolor) e os pontos analíticos relativos à datação U-Pb de três alíquotas de zircão (elipses cinza). A idade exibida refere-se à datação da monazita. b) Diagrama Concórdia para a amostra AM - 53B (facies Serra Azul) mostrando o ponto analítico relativo à datação U-Pb da monazita (elipse incolor) e os pontos analíticos relativos à datação U-Pb de duas alíquotas de zircão (elipses cinza). A idade exibida refere-se à datação da monazita. c) Histograma de frequência e curva de probabilidade acumulada das idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de 24 análises SHRIMP em zircão da amostra AM - 145 (facies Santa Bárbara fina). d) Diagrama de Tera & Wasserburg (1972) de quatro análises selecionadas do zircão tipo do Maciço Santa Bárbara.

Tabela 1. Resultados analíticos das datações U-Pb em monazita por espectrometria de massa por ionização térmica.

No. da amostra (fração magnética)	Peso (miligramas)	Pb (ppm)	U (ppm)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U*	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U*	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb*	Idade** <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> Pb	Idade** <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	Idade** <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
AM-52B	0,005650	2258	1847	200	0,16674(0,74)	1,6606(0,77)	0,072234(0,20)	994	994	993±4
AM-53B	0,003390	636	744	182	0,16670(2,39)	1,6556(2,53)	0,072029(0,79)	994	992	987±16

Tabela 2. Resultados analíticos das datações U-Pb em zircão por espectrometria de massa por ionização térmica.

No. da amostra (fração magnética)	Peso (miligramas)	Pb (ppm)	U (ppm)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U*	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U*	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb*	Idade** <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> Pb	Idade** <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	Idade** <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
AM-52B M(-3)	0,096018	33	286	296	0,08246(0,77)	1,3818(0,95)	0,121534(0,56)	511	881	1979±10
AM-52B M(-1)	0,086138	40	321	239	0,08343(0,80)	1,4092(0,87)	0,122501(0,33)	517	893	1993±6
AM-52B NM(-3)	0,061315	30	224	100	0,07410(1,06)	0,6859(2,15)	0,067131(1,76)	461	530	842±37
AM-53B	0,113470	318	1858	455	0,13638(1,07)	1,8732(1,11)	0,099619(0,28)	824	1072	1617±5
AM-53B	0,068440	406	1470	84	0,14209(0,88)	1,3917(1,97)	0,071034(1,65)	856	885	958±34

Tabelas 1 e 2: M, NM – frações magnética e não-magnética obtidas com Separador Isodinâmico de Frantz, com corrente elétrica de 1,5 ampère e inclinação frontal de 20°; inclinação lateral dada entre parênteses. \* Razões corrigidas pelo branco analítico e pelo chumbo inicial (Stacey & Kramers, 1975). Erros, entre parênteses, são dados em percentual e 2σ. \*\* Idades calculadas com base nas constantes de decaimento recomendadas por Steiger & Jäger (1977).

Tabela 3. Resultados analíticos das datações U-Pb em zircão por SHRIMP-RG.

No. da amostra (No. do ponto)	U (ppm)	Th (ppm)	Pb (ppm)	<sup>204</sup> Pb (ppb)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U*	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U*	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb*	Idade** <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> Pb	Idade** <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	Idade** <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
AM-145 (1)	141	77	42	2	0,2745(0038)	3,8389(0834)	0,1014(0015)	1563(19)	1601(18)	1651(28)
AM-145 (15)	48	31	11	33	0,1754(0061)	3,0885(3971)	0,1277(0153)	1042(34)	1430(104)	2067(227)
AM-145 (18)	6496	3648	1131	38	0,1623(0039)	1,6567(0433)	0,0740(0005)	970(22)	992(17)	1042(14)
AM-145 (20)	3103	1698	591	72	0,1777(0052)	1,8626(0577)	0,0760(0006)	1054(28)	1068(21)	1096(15)
AM-145 (9)	959	581	161	1	0,1550(0021)	1,5337(0254)	0,0718(0006)	929(12)	944(10)	979(17)
AM-145 (16)	357	412	63	35	0,1519(0026)	1,4843(0390)	0,0709(0013)	911(14)	924(16)	954(38)
AM-145 (21)	762	378	101	100	0,1284(0031)	1,2768(0481)	0,0721(0019)	779(18)	835(22)	989(54)
AM-145 (24)	318	312	48	12	0,1411(0022)	1,4017(0343)	0,0721(0012)	851(12)	890(15)	988(35)
AM-145 (2)	1725	764	166	45	0,0917(0017)	0,8000(0213)	0,0633(0011)	566(10)	597(12)	717(36)
AM-145 (3)	1827	34	408	1100	0,2414(0023)	2,4892(1189)	0,0748(0034)	1394(12)	1269(35)	1063(95)
AM-145 (4)	5584	3030	551	4784	0,0944(0013)	0,7339(0690)	0,0564(0052)	582(8)	559(41)	467(216)
AM-145 (5)	119	264	18	30	0,1351(0045)	1,3896(1322)	0,0746(0064)	817(26)	885(58)	1058(181)
AM-145 (6)	3490	1475	759	608	0,2130(0049)	2,1391(0645)	0,0728(0012)	1245(26)	1162(21)	1009(35)
AM-145 (7)	35	30	6	-	0,1581(0048)	1,6161(2017)	0,0741(0087)	946(27)	976(81)	1045(257)
AM-145 (8)	34	28	6	3	0,1573(0042)	1,4158(1845)	0,0653(0081)	942(24)	896(81)	784(285)
AM-145 (10)	1182	463	205	341	0,1695(0018)	1,6001(0696)	0,0685(0028)	1010(10)	970(28)	882(87)
AM-145 (11)	16966	7900	2670	2625	0,1592(0043)	1,5460(0473)	0,0705(0008)	952(24)	949(19)	941(23)
AM-145 (12)	4580	7454	848	8047	0,1543(0055)	1,2507(1389)	0,0588(0059)	925(31)	824(65)	560(236)
AM-145 (13)	577	6916	36	34	0,0302(0030)	0,2219(0309)	0,0533(0046)	192(19)	203(26)	340(210)
AM-145 (14)	438	358	75	38	0,1593(0015)	1,5645(0369)	0,0712(0015)	953(9)	956(15)	964(42)
AM-145 (17)	11367	2682	1809	821	0,1590(0026)	1,5417(0322)	0,0703(0008)	951(15)	947(13)	938(22)
AM-145 (19)	5130	2939	1132	432	0,2026(0079)	2,1119(0886)	0,0756(0008)	1189(43)	1153(29)	1085(22)
AM-145 (22)	556	481	95	1467	0,1419(0055)	1,6797(4007)	0,0859(0198)	855(31)	1001(164)	1335(526)
AM-145 (23)	5916	3353	1250	35	0,1995(0061)	2,0414(0651)	0,0742(0005)	1173(33)	1129(22)	1047(13)

\* Erros de contagem, entre parênteses, são absolutos, em 1σ, e referem-se às últimas casas decimais. \*\* Erros das idades, entre parênteses, são dados em 2σ, em milhões de anos.

de zircão da Suíte Intrusiva Santa Clara, enquanto que o 18 é de difícil enquadramento em função da variabilidade das idades, porém agrupado ao 20 com base na sua idade  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . O valor de 735 Ma é identificado unicamente nas análises descartadas, e interpretado como fruto de perturbações do sistema isotópico.

Do ponto de vista morfológico, observa-se que o zircão da facies Santa Bárbara fina pertence a dois tipos bem distintos. Um deles é prismático curto e tem zoneamento oscilatório largo, que indica condições de subsaturação em zircão durante a cristalização do magma (*cf.* Vavra, 1990; cristais 8, 9, 11, 17 e 21; Fig. 4). O outro tipo é prismático longo e ocorre como sobrecrecimentos, em cristais nos quais a presença de núcleos herdados é denunciada por superfícies de dissolução (cristais 5, 7, 14, 16 e 24; Fig. 4).

O zircão de  $1651 \pm 28$  Ma apresenta zoneamento oscilatório bem desenvolvido e ocorre como sobrecrecimento sobre núcleo com a mesma estrutura, o que aponta para condições de cristalização ígnea e para a existência de evento geológico ainda mais antigo (Fig. 4).

O zircão de idade compatível com o magmatismo Santa Clara (pontos 18 e 20) tem características muito semelhantes àquelas do zircão do tipo 1 do Maciço Granítico Santa Bárbara, sendo bastante expressivas as feições de recristalização (*cf.* Pidgeon, 1992; Fig. 4).

Comum à maioria dos cristais cujas análises foram descartadas é o zoneamento oscilatório alargado e/ou modificado em consequência de reações secundárias, que culminam com o desenvolvimento de regiões centrais escuras e convolutas onde se observam altas concentrações de U e Th (cristais 4, 6, 8, 10, 11, 19, 22 e 23) (Fig. 4). Tais feições foram descritas e interpretadas por Pidgeon *et al.* (1998) como devidas à reconstituição do zircão em sistema fechado durante o resfriamento do granito a partir de altas temperaturas, e resultam geralmente em discordância inversa. No Maciço Granítico Santa Bárbara, entretanto, não se pode descartar que tais feições resultem também de reações pós-magmáticas, dadas as intensas interações rocha-fluido que acompanharam a mineralização. Feições de recristalização (*cf.* Pidgeon, 1992), na forma de manchas difusas que obliteram o zoneamento magmático, também são observadas (cristais 11 e 21; Fig. 4).

A metamictização provavelmente concorreu para a perturbação do sistema isotópico U-Pb, especialmente no caso dos cristais fortemente discordantes, como o 2 e o 13, haja vista as altas concentrações de U e Th observadas em boa parte das análises.

## Método Sm-Nd

As mesmas amostras que tiveram zircão e monazita datados via U-Pb foram submetidas a análises Sm-Nd em rocha total. As idades-modelo  $T_{DM}$  resultaram em valores crescentes da facies Serra do Cícero (1711 Ma) para a associação de facies Santa Bárbara (2221 Ma), passando pela facies Serra Azul (1846 Ma), com  $\epsilon_{Nd}(T)$  de -2,95, -4,58, e -3,69, respectivamente (Tabela 4).

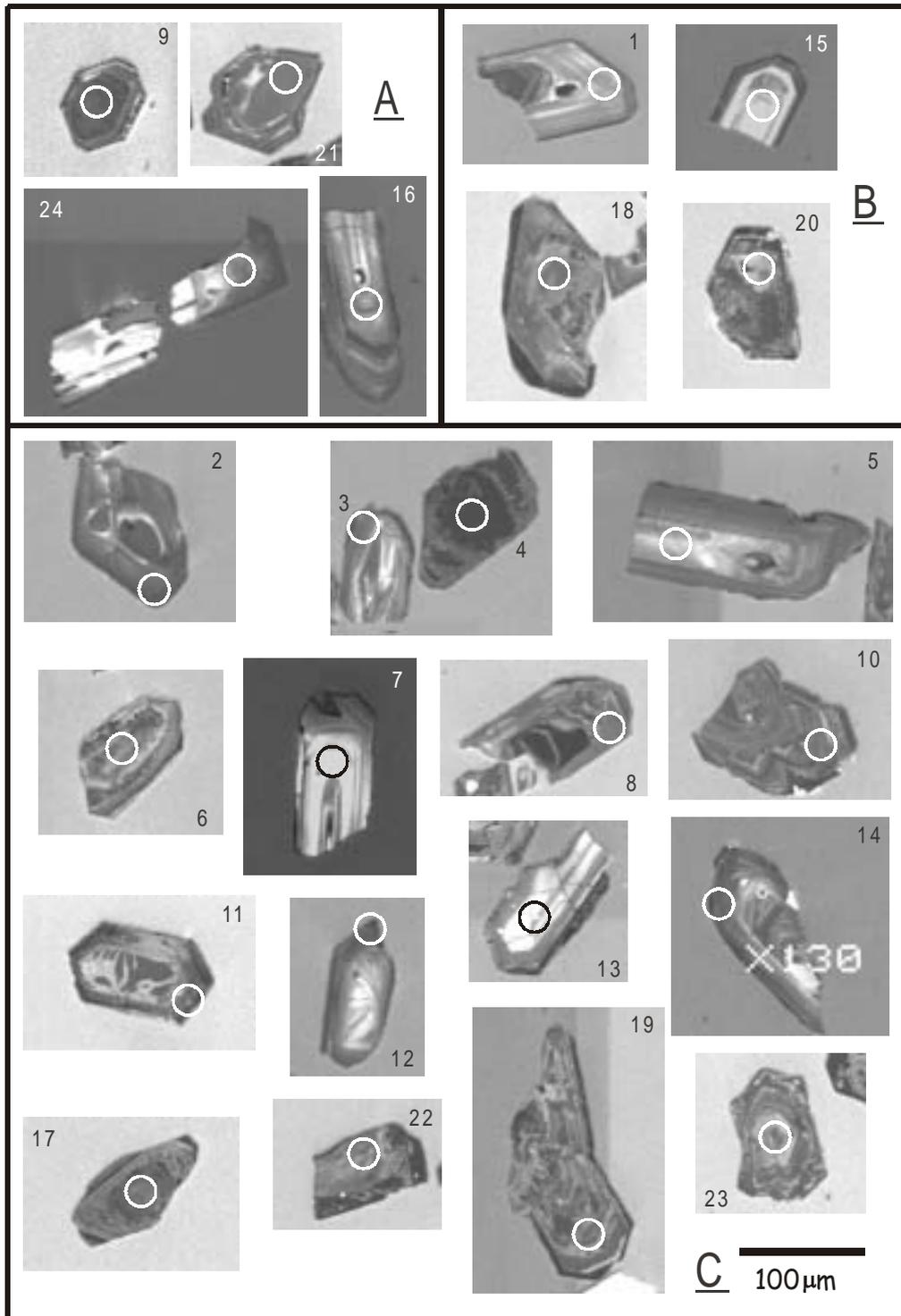
Dados litogeoquímicos e de química mineral apontam para a geração dos granitos do Maciço Granítico Santa Bárbara a partir da diferenciação do mesmo magma. Fracionamento dos ETRL é observado da facies Serra do Cícero para a Serra Azul e, finalmente, para a Santa Bárbara fina, e expresso pelos valores de  $(La/Yb)_N$  de 4,67, 3,91 e 1,81, respectivamente (Sparrenberger, dados inéditos).

Noventa a noventa e cinco por cento em peso do conteúdo de ETRL dos granitos peraluminosos estão contidos nas fases minerais acessórias concentradoras desses elementos, enquanto que os feldspatos respondem por 5 - 10% em peso do total de ETRL nessas rochas (Bea, 1996). No Maciço Granítico Santa Bárbara, a monazita é frequente na facies Serra do Cícero, mas escassa nas facies Serra Azul e Santa Bárbara fina. Com uma porcentagem mínima de 62% de  $\text{ETR}_2\text{O}_3$  (Sparrenberger, dados inéditos), a fase mineral constitui o principal carreador dos ETRL nesses granitos, acompanhada, subordinadamente, pelos feldspatos, e reflete o fracionamento dos ETRL identificado.

Dada a cogeneticidade das rochas estudadas, a variação de aproximadamente 500 m.a. nas idades-modelo  $T_{DM}$  é entendida como anômala. Valores de  $T_{DM}$  errôneos para granitos altamente silicosos com razões  $(La/Yb)_N \leq 3,0$  também foram observados por Pimentel & Charnley (1991).

Contrariamente ao observado nas amostras do Maciço Granítico Santa Bárbara, foi reconhecido aumento de até uma ou duas unidades no valor do  $\epsilon_{Nd}(T)$  dos topázios granitos tardios mineralizados em relação àqueles estereis mais precoces nos maciços rapakivi da Finlândia, Rússia e China, fenômeno atribuído a processos pós-magmáticos (Rämö *et al.*, 1997).

A reconhecida mobilidade do ETR durante processos pós-magmáticos (Bea, 1996), bem como a partição desses elementos para fluidos ricos em flúor, na forma de complexos do elemento (Muecke & Clarke, 1981), também podem ter concorrido para o fracionamento observado.



**Figura 4.** Imagens de catodoluminescência do zircão da AM-145 (facies Santa Bárbara fina) datado via SHRIMP-RG. **Grupo A:** cristais cujos pontos datados são representativos da cristalização da facies. **Grupo B:** cristais cujos pontos datados representam herança. **Grupo C:** cristais cujas análises foram desconsideradas. Ponto analisado representado por círculo, com o respectivo número grafado na imagem. A escala é a mesma para todos os grãos.

Tabela 4. Resultados analíticos Sm-Nd em rocha total.

Amostra	Idade (Ma)	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}^*$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	$T_{\text{DM}}^{**}$
AM-52B	993	16,54	83,43	0,11987	0,511988(13)	-12,68	-0,39	-2,95	1711
AM-53B	989	17,77	83,86	0,12810	0,512005(13)	-12,35	-0,35	-3,69	1846
AM-145	978	14,18	57,75	0,14849	0,512095(18)	-10,59	-0,25	-4,58	2221

\* Erro absoluto dado em  $1\sigma$ . Refere-se às últimas casas decimais. \*\* Idade-modelo de acordo com DePaolo (1981).

## DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A monazita é um mineral particularmente apropriado para a datação U-Pb de granitos em que a herança de zircão é comum (Parrish, 1990). Embora possa ocorrer como restito em líquidos graníticos gerados por anatexia a temperaturas da ordem de 700 a 800°C (Rapp *et al.*, 1987), sua temperatura de bloqueio para a difusão de Pb ( $725 \pm 25^\circ\text{C}$ ; Copeland *et al.*, 1988) menor do que a do zircão coincide com o intervalo de temperaturas magmáticas de líquidos graníticos, tornando a herança do sistema U-Pb rara. A fase também traz a vantagem de raramente tornar-se metamórfica, apresentando perda de Pb em baixas temperaturas muito menos comum do que o zircão (Parrish, 1990). Assim, os dados de  $993 \pm 5$  Ma e  $989 \pm 13$  Ma obtidos pela datação U-Pb de monazita para as facies Serra do Cícero e Serra Azul, respectivamente, são admitidos como as idades da cristalização magmática desses granitos.

A idade U-Pb SHRIMP em zircão de  $978 \pm 13$  Ma para a facies Santa Bárbara fina é interpretada como idade da cristalização magmática do granito, e concorda, dentro do intervalo dos erros, com as idades das demais facies do Maciço Granítico Santa Bárbara, apontando para a possível contemporaneidade das mesmas.

Segundo Pidgeon (1992), a recristalização progressiva do zircão resulta da instabilidade do mineral provocada pela incorporação de altas concentrações de elementos contaminantes em solução sólida, como TR, U e Th, que distorcem seu retículo cristalino. Ela pode se dar logo após o término da cristalização primária ou em evento posterior, e constitui um mecanismo de zeragem do geocronômetro U-Pb. Portanto, a datação de zircão recristalizado, que tende a ser concordante ou pouco discordante, fornece uma idade mínima para a cristalização primária do mineral. Idades mistas, resultantes da recristalização parcial e remoção incompleta do Pb radiogênico, são possíveis.

As reações secundárias (*cf.* Pidgeon *et al.*, 1998) que afetaram boa parte dos cristais de zircão do Maciço Granítico Santa Bárbara, tidas como ocorridas em regime magmático, provavelmente foram favorecidas ou intensificadas pela permanência do magma granítico original, rico em flúor, em estado líquido por tempo mais longo do que o usual para magmas desprovidos do referido elemento, em consequência da diminuição da temperatura da *liquidus* (Manning, 1981).

A circulação dos fluidos ácidos responsáveis pela greisenização observada na associação de facies Santa Bárbara, datada em  $961 \pm 19$  Ma (K-Ar em mica de *greisen*; Leite Júnior *et al.*, 2001), é admitida como possível causa da recristalização do zircão da AM-145.

Componentes herdados com idades mínimas  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de 1617, 1651, 1979, 1993 e 2067 Ma, além daquele representativo do magmatismo Santa Clara, ocorrem nas três unidades do Maciço Granítico Santa Bárbara. Dentre as associações litológicas que constituem o embasamento da porção centro-leste da Província Estanífera de Rondônia, a dos paragnaisses possui zircão com idades mínimas entre 1673 e 1808 Ma, e a possibilidade de que essas rochas derivem de uma fonte com idade entre 1,8 e 2,0 Ga é aventada por Payolla *et al.* (2002). Logo, a herança de zircão a partir de rochas das associações dos paragnaisses e/ou dos *augen*-gnaisses graníticos e charnockíticos e dos gnaisses graníticos e granulitos charnockíticos finos, ainda que subordinada, é sugerida pelos dados.

Os valores de  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  (-2,95) e  $T_{\text{DM}}$  (1,7 Ga) da facies Serra do Cícero são admitidos como representativos para o Maciço Granítico Santa Bárbara. Indicam fonte crustal para o protólito, diferenciado do manto em 1,7 Ga.

Os componentes herdados presentes no maciço indicam a existência de rochas mais antigas do que 1,8 Ga no setor sul da Província Rio Negro-Juruena.

A herança comum de zircão no Maciço Granítico Santa Bárbara, bem como a complexidade textural observada no mineral, que reflete importantes perturbações do sistema isotópico U-Pb, documentam amplamente as dificuldades envolvidas na datação U-Pb convencional dos granitos estudados. A datação U-Pb pelo método SHRIMP, ou mesmo a datação U-Pb convencional de monazita, quando a fase está presente, são alternativas muito mais apropriadas para o estudo geocronológico desse tipo de rocha.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é parte da Tese de Doutorado de Irena Sparrenberger e decorre de projetos com recursos de agências às quais os autores agradecem: FAPESP (processo 2.000/08033-5), outorgado a Jorge S. Bettencourt; bolsa de Doutorado FAPESP para Irena Sparrenberger (processo 1.998/04469-1); PADCT/FINEP (Convênio 64.99.0276.00/GTM/PADCT).

Este trabalho é uma contribuição ao projeto IGCP/UNESCO 426 - *Granite Systems and Proterozoic Lithospheric Processes*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASEI, M. A. S.; SIGA JR., O.; SATO, K.; SPROESSER, W. M. (1995) A metodologia Urânio-Chumbo na Universidade de São Paulo. Princípios Metodológicos, Aplicações e Resultados Obtidos. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, v. 67, n. 2, p. 221-237.
- BEA, F. (1996) Residence of REE, Y, Th and U in Granites and Crustal Protoliths; Implications for the Chemistry of Crustal Melts. *Journal of Petrology*, v. 37, n. 3, p. 521-552.
- BETTENCOURT, J. S.; DALL'AGNOL, R.; YOKOI, O. Y.; VIGLIO, E. P.; PINHO, O. G.; SILVA, R. F.; CARNEIRO Fº, L. (1987) The Rondonian tin-bearing anorogenic granites and associated mineralization. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS, 1., Salvador, 1987. *Excursions Guide*. Salvador, 1987, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, p. 49-87.
- BETTENCOURT, J. S.; LEITE JR., W. B.; PAYOLLA, B. L.; SCANDOLARA, J. E.; MUZZOLON, R.; VIAN, J. A. J. (1997) The rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, northern Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS, 2., Salvador, 1997. *Excursions Guide*. Salvador, 1997, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral/Superintendência de Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, p. 3-31.
- BETTENCOURT, J. S.; TOSDAL, R. M.; LEITE JR., W. B.; PAYOLLA, B. L. (1999) Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, southwestern border of the Amazonian Craton, Brazil: I. Reconnaissance U-Pb geochronology and regional implications. *Precambrian Research*, v. 95, n.1-2, p. 41-67.
- COMPANHIA ESTANÍFERA DO BRASIL (1994) *Projeto Integração: Mapa Geológico – Folha 2C*. (inédito).
- COMPSTON, W.; WILLIAMS, I. S.; MYER, C. (1984) U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Journal of Geophysical Research*, v. 89, suppl.B, p. 525-534.
- COPELAND, P.; PARRISH, R. R.; HARRISON, T. M. (1988) Identification of inherited radiogenic Pb in monazite and its applications for U-Pb systematics. *Nature*, v. 333, n. 6175, p. 760-763.
- CORDANI, U. G.; TASSINARI, C. C. G.; TEIXEIRA, W.; BASEI, M. A. S.; KAWASHITA, K. (1979) Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: CONGRESSO GEOLOGICO CHILENO, 2., Arica, 1979. *Actas*. Arica, v. 4, p.137-148.
- CORFU, F.; STOTT, G. M. (1986) U/Pb ages for late magmatism and regional deformation in the Shebandowan Belt, Superior Province, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 23, n. 8, p. 1075-1082.
- DePAOLO, D. J. (1981) A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n. B11, p. 10470-10488.
- EMSLIE, R. F. (1991) Granitoids of rapakivi granite-anorthosite and related associations. *Precambrian Research*, v. 51, n. 1-4, p. 173-192.
- FRANK, R. E. (1990) *Geologia, petrologia e mineralizações estaníferas do Complexo Granítico de Santa Bárbara, Rondônia, Brasil*. Rio de Janeiro, 244p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GALEMBECK, T. M. B. (1997) *O complexo múltiplo, centrado e plurisserial Itu – SP*. Rio Claro, 374 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

- GERALDES, M. C.; VAN SCHMUS, W. R.; CONDIE, K. C.; BELL, S.; TEIXEIRA, W.; BABINSKI, M. (2001) Proterozoic geologic evolution of the SW part of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, v. 111, n. 1-4, p. 91-128.
- GIOIA, S. M. C. L.; PIMENTEL, M. M. (2000) The Sm-Nd Isotopic Method in the Geochronology Laboratory of the University of Brasília. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, v. 72, n. 2, p. 219-245.
- HUTCHINSON, C. S. (1974) *Laboratory handbook of petrographic techniques*. New York, John Wiley & Sons. 527p.
- ISOTTA, C. A. L.; CARNEIRO, J. M.; KATO, H. T.; BARROS, R. J. L. (1978) *Projeto Província Estanífera de Rondônia*. Porto Velho. DNP/M/CPRM. Vols. 1-3. (Relatório final).
- KROGH, T. E. (1973) A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 37, n. 3, p. 485-494.
- KROGH, T. E. (1982) Improved accuracy of U/Pb dating by selection of more concordant fractions using a high gradient magnetic separation technique. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46, n. 4, p. 631-636.
- LEITE JR., W. B.; PAYOLLA, B. L.; BETTENCOURT, J. S. (2000) Petrogenesis of two Grenvillian tin-bearing rapakivi granite suites, southwestern Amazonian craton, Rondônia, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., Rio de Janeiro, 2000. *Abstracts Rio de Janeiro, CPRM*. (CD-ROM)
- LEITE JR., W. B.; PAYOLLA, B. L.; BETTENCOURT, J. S.; TASSINARI, C. C. G. (2001) New K-Ar ages of the primary tin mineralization in the Rondônia Tin Province, Brazil. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 3., Pucón, 2001. *Extended Abstracts Volume*. Pucón, Serviço Nacional de Geología y Minería de Chile/Departamento de Geología de la Universidad de Chile, p. 484-487.
- LUDWIG, K. R. (1999) User's Manual for Isoplot/Ex version 2.10: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1a*.
- LUGMAIR, G. W.; MARTI, K. (1978) Lunar initial  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ : Differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 39, n. 3, p. 349-357.
- MANNING, D. A. C. (1981) The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 76, n. 2, p. 206-215.
- MICHARD, A.; GURRIET, P.; SOUNDANT, M.; ALBARÉDE, F. (1985) Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. internal aspects of crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 49, n. 2, p. 601-610.
- MUECKE, G. K.; CLARKE, D. B. (1981) Geochemical evolution of the South Mountain batholith, Nova Scotia: rare-earth-element evidence. *Canadian Mineralogist*, v. 19, n. 1, p. 133-145.
- O'NIONS, R. K.; HAMILTON, P. J.; EVENSON, N. M. (1977) Variations in  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 34, p. 13-22.
- PARRISH, R. R. (1990) U-Pb dating of monazite and its application to geological problems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 27, n. 11, p. 1431-1450.
- PAYOLLA, B. L.; BETTENCOURT, J. S.; LEITE JR., W. B.; BASEI, M. A. S. (2001a) The Rio Crespo Intrusive Suite: geological U-Pb and Sm-Nd isotopic evidence for a major 1.43 Ga arc-related magmatism in the Rondônia State, SW Amazonian Craton, Brazil. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 3., Pucón, 2001. *Extended Abstracts Volume*. Pucón, Serviço Nacional de Geología y Minería de Chile/Departamento de Geología de la Universidad de Chile, p. 199-202.
- PAYOLLA, B. L.; BETTENCOURT, J. S.; LEITE JR., W. B.; BASEI, M. A. S. (2001b) The Rio Crespo Intrusive Suite: geological U-Pb and Sm-Nd isotopic evidence for a major 1.43 Ga arc-related magmatism in the Rondônia State, SW Amazonia Craton, Brazil. In: BETTENCOURT, J. S.; TEIXEIRA, W.; PACCA, I. I. G.; GERALDES, M. C.; SPARRENBERGER, I. (eds.) WORKSHOP ON GEOLOGY OF THE SW AMAZONIAN CRATON: STATE-OF-THE-ART. São Paulo, 2001. *Extended Abstract Volume*. São Paulo, p. 96-99.
- PAYOLLA, B. L.; BETTENCOURT, J. S.; KOZUCH, M.; LEITE JR., W. B.; FETTER, A. H.; VAN SCHMUS, W. R. (2002) Geological evolution of the basement rocks in the central-eastern part of the Rondônia Tin Province, SW Amazonian Craton, Brazil: U-Pb and Sm-Nd isotopic constraints. *Precambrian Research*, v. 119, n. 1-4, p. 1-29.
- PIDGEON, R. T. (1992) Recrystallisation of oscillatory zoned zircon: some geochronological and petrological implications. *Contributions to Mineralogy and*

- Petrology*, v. 110, n. 4, p. 463-472.
- PIDGEON, R. T.; NEMCHIN, A. A.; HITCHEN, G. J. (1998) Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 132, n.3, p. 288-299.
- PIMENTEL, M. M.; CHARNLEY, N. (1991) Intracrustal REE fractionation and implications for Sm-Nd model age calculations in late-stage granitic rocks: An example from central Brazil. *Chemical Geology*, v. 86, n. 2, p. 123-138.
- PRIEM, H. N. A.; BOELRIJK, N. A. I. M.; HEBEDA, E. H.; VERDUMEN, E. A. T.; VERSCHURE, R. H.; BON, E. H. (1971) Granitic complexes and associated tin mineralization of Grenville age in Rondônia, western Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, v. 82, n. 4, p. 1095-1102.
- PRIEM, H. N. A.; BOELRIJK, N. A. I. M.; HEBEDA, E. H.; VERSCHURE, R. H.; BON, E. H. (1966) Isotopic age of tin granites in Rondônia, N.W. Brazil. *Geologie en Mijnbouw*, v. 45, n. 6, p. 191-192.
- PRIEM, H. N. A.; BON, E. H.; VERDUMEN, E. A. T.; BETTENCOURT, J. S. (1989) Rb-Sr chronology of precambrian crustal evolution in Rondônia (western margin Brazilian craton). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 2, n. 2, p. 163-170.
- RÄMÖ, O. T.; VAASJOKI, M.; HAAPALA, I. (1997) Isotopic insights into the origin of tin-mineralized and barren granites in selected Proterozoic rapakivi granite complexes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS, 2., Salvador, 1997. *Abstracts*. Salvador, 1997, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral/Superintendência de Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, p. 286-287.
- RAPP, R. P.; RYERSON, F. J.; MILLER, C. F. (1987) Experimental evidence bearing on the stability of monazite during crustal anatexis. *Geophysical Research Letters*, v. 14, n. 3, p. 307-310.
- RIZZOTTO, G. J.; SCANDOLARA, J. E.; QUADROS, M. L. do E. S. (1996) Aspectos gerais da associação mangerito-charnockito-granito (MCG) da porção oriental do sul de Rondônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., Salvador, SBG/Núcleo Bahia-Sergipe, 1996, v.1, p. 35-37.
- SPARRENBERGER, I.; BETTENCOURT, J. S. (2000) The tin mineralization at the Santa Bárbara Massif, Rondônia Tin Province, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., Rio de Janeiro, 2000. *Abstracts*. Rio de Janeiro, CPRM.. (CD-ROM)
- SPARRENBERGER, I.; BETTENCOURT, J. S. (2002a) O Maciço Granítico Santa Bárbara, Província Estanífera de Rondônia – Parte I. Caracterização petrográfica e geoquímica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41., João Pessoa, 2002. *Resumos*. João Pessoa, SBG – Núcleo Nordeste, p. 475.
- SPARRENBERGER, I.; BETTENCOURT, J. S. (2002b) O Maciço Granítico Santa Bárbara, Província Estanífera de Rondônia – Parte II. A mineralização estanífera em greisens acamados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41., João Pessoa, 2002. *Resumos*. João Pessoa, SBG – Núcleo Nordeste, p. 475.
- STACEY, J. S.; KRAMERS, J. D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 26, n. 2, p. 207-221.
- STEIGER, R. H.; JÄGER, E. (1977) Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 36, n. 3, p. 359-362.
- TASSINARI, C. C. G. (1996) *O mapa geocronológico do cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos*. São Paulo, 139 p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- TASSINARI, C. C. G.; BETTENCOURT, J. S.; GERALDES, M. C.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. (2000) The Amazonia Craton. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*, p. 41-95.
- TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C. C. G.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K. (1989) A review of the geochronology of the Amazonian craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, v. 42, n. 3-4, p. 213-227.
- TERA, F.; WASSERBURG, G. J. (1972) U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 14, n. 3, p. 281-304.
- VAVRA, G. (1990) On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: a cathodoluminescence study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 106, p. 90-99.
- WASSERBURG, G. J.; JACOBSEN, S. B.; DePAOLO, D. J.; McCULLOCH, M. T.; WEN, T. (1981) Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 45, n. 12, p. 2311-2323.

- WETHERILL, G. W. (1956) Discordant uranium-lead ages. *Transactions American Geophysical Union*, v. 37, n. 3, p. 320-326.
- WILLIAMS, I. S. (1997) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe: not just ages but histories. *Reviews in Economic Geology*, v. 7, p. 1-35.