

## A Metodologia Urânio-Chumbo na Universidade de São Paulo. Princípios Metodológicos, Aplicações e Resultados Obtidos

MIGUEL ANGELO STIPP BASEI, OSWALDO SIGA JUNIOR, KEI SATO  
e WALTER MAURÍCIO SPROESSER

Centro de Pesquisas Geocronológicas, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo,  
Caixa Postal 20899 - 01498-970 Cidade Universitária, São Paulo, SP

*Manuscrito recebido em 7 de junho de 1994; aceito para publicação em 5 de dezembro de 1994  
credenciado por UMBERTO G. CORDANI*

### ABSTRACT

É bastante antigo o interesse em realizar-se análises geocronológicas pelo método Urânio-Chumbo (U-Pb) nos laboratórios do Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Entretanto, tal intenção somente começou a materializar-se após a aquisição em 1987 de novos espectrômetros de massa capazes de analisarem, com a precisão desejada, os isótopos de urânio e de chumbo.

Este artigo tem como objetivo discutir alguns dos resultados U-Pb integralmente produzidos em São Paulo, bem como apresentar um panorama da fase atual dessa metodologia no CPGeo após quase uma década de esforços que envolveram a adequação do laboratório à nova metodologia, o treinamento de pessoal em universidades do exterior e, principalmente, o estabelecimento da rotina analítica.

Serão comentados, à guisa de exemplo, resultados pioneiros obtidos em granitóides não deformados dos terrenos Pré-Cambrianos do Paraná, bem como, de dois charnockitos da Nappe Socorro Guaxupé (SP-MG). Esses dados foram considerados satisfatórios após terem sido precedidos de um controle analítico que envolveu outras metodologias radiométricas, bem como, análises de zircões em laboratórios do exterior.

**Key words:** geocronologia, isótopos, curva Concórdia.

### INTRODUÇÃO

O sistema U-Pb tem sido utilizado para fornecer idades radiométricas desde a primeira metade deste século. Trata-se entretanto, de uma metodologia em constante aprimoramento onde o contínuo avanço na capacitação tecnológica dos laboratórios tem permitido um refinamento maior das análises com a consequente obtenção de resultados até então impossíveis com a utilização das técnicas convencionais.

Trata-se de uma ferramenta que tem permitido a resolução de inúmeros problemas geológicos, devido, principalmente, à excepcional resistência do

retículo cristalino dos zircões com relação a modificações posteriores à sua criação. A espetacular "memória" dos zircões retendo idades de eventos iniciais, mesmo que apenas em seu núcleo, permite sua aplicação ao estudo da evolução de terrenos policíclicos. Além disso, a resistência aos processos intempéricos possibilita a análise de zircões detriticos obtidos em rochas sedimentares. É também um método muito utilizado na datação de deformações polifásicas onde, associados aos dobramentos tem-se mobilizados neossomáticos com zircões, titanitas ou monazitas neoformados.

Como em todo estudo geocronológico, os resultados U-Pb serão melhor aproveitados quando combinados com os obtidos por outras metodologias, as quais fornecem informações complementares para a compreensão da história geológica da região investigada.

### GENERALIDADES

Remonta a 1935 o conhecimento de que o urânio possui dois isótopos ( $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ ) responsáveis pela origem de duas séries de desintegrações radioativas produzindo, respectivamente, como produtos finais, os isótopos de chumbo  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}$ . A utilização desses cronômetros para a determinação de idades de minerais e rochas prendem-se às regras básicas da radioatividade, onde um nuclídeo radioativo tende a transformar-se em outro (radiogênico). A probabilidade do nuclídeo se desintegrar espontaneamente por unidade de tempo é denominada constante de desintegração  $\lambda$ . Cada nuclídeo possui um  $\lambda$  próprio, relacionado com a velocidade do processo (Fig. 1).

Como nos demais métodos radiométricos, o decaimento radioativo é representado matematicamente por uma equação exponencial negativa do tipo  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ .

Resolvendo a equação acima em  $t$ , surge a equação fundamental da geocronologia:

$$t = 1/\lambda * \ln [1 + (F - F_0)/P]$$

onde:  $t$  = instante inicial (idade);  $P$  = quantidade de nuclídeo radioativo;  $F$  = quantidade de nuclídeo radiogênico total presente no sistema e,  $F_0$  = quantidade inicial do nuclídeo radiogênico.

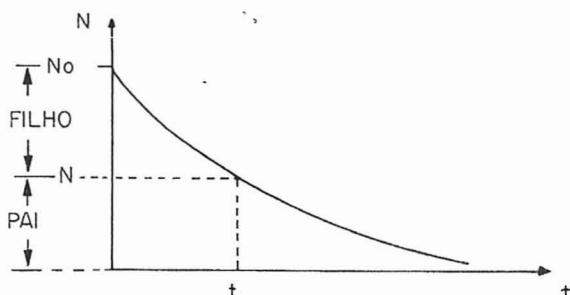


Fig. 1 — Diagrama esquemático da curva exponencial produzida pelo decaimento de um isótopo radioativo.

Para obter-se a idade radiométrica basta medir-se  $P$  e  $F$  e conhecer-se  $\lambda$ . Esta última representa um fenômeno nuclear independente de fatores físicos e químicos externos podendo, portanto, ser considerada como uma constante. Atualmente, usa-se os seguintes valores definidos por Steiger & Jäger (1977):

$$\lambda^{238}\text{U} = 1,55125 \times 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$$

$$\lambda^{235}\text{U} = 9,8485 \times 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$$

A resolução da equação fica então na dependência do conhecimento de  $F_0$ , isto é, deve ser possível conhecer, ou no mínimo estimar com certa precisão, a quantidade inicial do nuclídeo radiogênico.

O sistema U-Pb é o único a oferecer dois cronômetros radiométricos independentes para um mesmo par de elementos obtidos de um único material. Ao analisar-se os zircões de uma rocha pode-se, através do método da diluição isotópica, medir-se com precisão, a quantidade dos isótopos radioativos  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  bem como, dos isótopos radiogênicos estáveis  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}$ .

As idades radiométricas são conhecidas utilizando-se, no caso do par  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ , a equação:

$$^{206}\text{Pb rad} = ^{238}\text{U} (e^{\lambda t} - 1)$$

que, resolvida em  $t$ , fornece:

$$t = 1/\lambda \left\{ \ln \left[ 1 + ((^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0) / (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}) \right] \right\}$$

Esse mesmo desenvolvimento matemático deve ser aplicado para a determinação da idade do par  $^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ :

$$t = 1/\lambda \left\{ \ln \left[ 1 + ((^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0) / (^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}) \right] \right\}$$

Uma terceira idade pode ser calculada através da combinação das duas equações acima referidas. A razão  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  é uma constante para uma determinada época, sendo atualmente de 1/137,88. Dessa relação pode-se obter a idade  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  (método Pb-Pb).

Mesmo considerando-se que o procedimento efetuado tenha sido analiticamente correto e preciso, os resultados obtidos terão significado geológico somente se algumas premissas tiverem sido respeitadas:

— a correção do Pb inicial deve ser adequada, dentro dos parâmetros de precisão desejados.

— o equilíbrio radioativo deve ter sido mantido (o radônio é um gás nobre que aparece nas duas séries de decaimento do U com meia vida de alguns dias, e não deve poder escapar do sistema);

— o sistema deve permanecer sempre fechado em relação a perdas ou acréscimos de U e/ou Pb.

Da utilização dos diferentes pares radiométricos percebeu-se que, na maioria dos casos, os valores de idades obtidos em cada um deles eram discrepantes entre si. Este fato foi atribuído a fenômenos de metamictização, isto é, centros radioativos de U e Th que, atuantes num certo período de tempo, provocariam a destruição gradativa do retículo cristalino dos zircões, permitindo a difusão do Pb.

Aos trabalhos de L. H. Ahrens (1955) e posteriormente G. W. Wetherill (1956) deve-se o conceito da curva "Concórdia" (Fig. 2) a qual representa o lugar geométrico dos pontos de idades concordantes, obtidas pelos dois cronômetros  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  e, por conseguinte, também do par  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

Desde que um ponto analítico não esteja situado sobre a curva Concórdia as três idades deixam de ser iguais. Os resultados fornecidos por cada um dos cronômetros separadamente é diferente, diz-se então ter-se uma discordância. A reta que contém os diferentes pontos discordantes recebe o nome de "Discórdia" (Fig. 2).

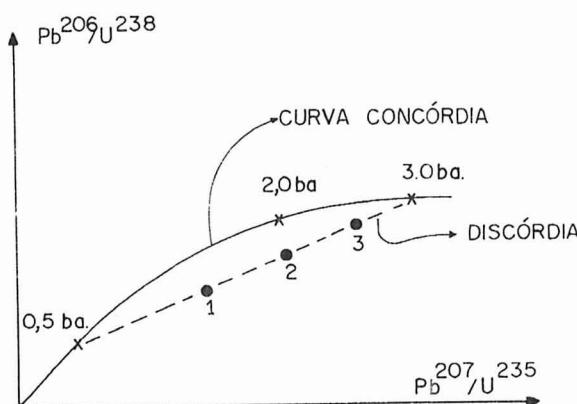


Fig. 2 — Diagrama Concórdia com os pontos analíticos posicionando-se segundo a reta Discórdia. Quanto mais afastado da curva maior será o grau de discordância do material analisado.

O intercepto superior da reta Discórdia sobre a curva Concórdia caracteriza a época de cristalação dos zircões. Para o intercepto inferior existem interpretações que o relacionam a uma *perda episódica* (a perda em chumbo estaria vinculada a um episódio tectônico e portanto o valor encontrado teria significado geológico) ou então, a uma *perda contínua* (perda de chumbo por difusão contínua, não possuindo portanto, a idade encontrada, qualquer validade geológica).

Atualmente, salvo em casos particulares, ao intercepto inferior da curva Discórdia não tem sido atribuído um significado geológico. Por outro lado, a idade definida pelo intercepto superior será tão mais confiável quanto mais concordantes forem os pontos analíticos dos materiais analisados.

#### MATERIAIS UTILIZADOS

Teoricamente pode-se utilizar todo sistema rico em urânio, ou seja, todo material que tenha urânio suficiente para permitir a formação de quantidade de chumbo radiogênico possível de ser medida e que, ao mesmo tempo, incorpore apenas pequena quantidade de chumbo de outra origem que não produto da desintegração do elemento radioativo.

Os zircões são os minerais preferidos pois, além de serem encontrados em quase todas as rochas, de composição desde ácida até básica, apresentam riqueza em urânio e incompatibilidade geoquímica com o chumbo, sendo este, quase em sua totalidade, de origem radiogênica. Além disso, os zircões são minerais de grande resistência aos agentes intempéricos o que permite sua aplicação à datação de rochas sedimentares utilizando-se zircões detriticos. Finalmente, o zircão apresenta, em muitos casos, grande estabilidade no tocante às variações das condições físico-químicas podendo preservar idades antigas, mesmo em rochas submetidas a episódios metamórficos de grande intensidade, capazes de rejuvenescer completamente outros cronômetros radiométricos.

Além do zircão, a monazita e a titanita são também procurados pelos geocronólogos por apresentarem, em geral, idades "concordantes" (pontos analíticos sobre a curva Concórdia). Quando estes

situam-se no intercepto superior temos casos simples de rochas ígneas ou metamórficas em áreas não policíclicas, caso contrário, eles indicarão a idade do segundo episódio, bastando que este tenha atingido temperaturas da ordem de 500 a 600°C.

#### CARACTERÍSTICAS E ROTINA ANALÍTICA DO LABORATÓRIO URÂNIO-CHUMBO DO CENTRO DE PESQUISAS GEOCRONOLÓGICAS (CPGeo)

A atual característica do laboratório U-Pb do CPGeo foi adquirida através de uma evolução contínua, resultado de uma preparação que envolveu, além do grande interesse do laboratório em realizar análises em zircões, a formação de recursos humanos em laboratórios do exterior, o intercâmbio com pesquisadores estrangeiros e, principalmente, a aquisição dos equipamentos necessários ao desenvolvimento da metodologia.

Devido às características inerentes à metodologia U-Pb foi necessária a criação de uma infraestrutura própria para seu desenvolvimento nos laboratórios do CPGeo. Esse processo necessitou de recursos financeiros relativamente elevados e de longo tempo para vencer a fase de testes e iniciar a produção de resultados internacionalmente confiáveis.

No momento o laboratório químico, peça fundamental da metodologia, apresenta uma sala "super limpa" dotada de um sistema de insuflamento de ar contendo pré-filtros e filtros absolutos que garantem um ambiente com pressão positiva de ar limpo. O laboratório é dotado de duas capelas de pressão positiva com filtros absolutos as quais estão lateralmente acoplados, dois sistemas de acrílico, interconectados a uma capela de exaustão, onde é realizada a evaporação das soluções durante as análises químicas.

Todos esses cuidados são essenciais para diminuir-se, ao máximo, os problemas introduzidos pela contaminação do chumbo presente no ambiente. Atualmente, essa contaminação é da ordem de 2 picogramas.

A rotina das amostras desde sua entrada nos laboratórios até o resultado final, pode ser resumi-

da em três etapas principais: 1) Concentração e purificação das populações de zircões; 2) Análise química e 3) Espectrometria de massa e cálculo da idade. Essa rotina, válida para o CPGeo é, apesar de diferenças nos procedimentos, utilizada pela maioria dos laboratórios.

#### CONCENTRAÇÃO E PURIFICAÇÃO DE MINERAIS

A rocha contendo de 2 a 20kg, dependendo de sua natureza e consequente riqueza em zircões é fragmentada em pedaços que permitem sua passagem em britador de mandíbulas. Este produz a fragmentação da rocha a uma granulometria inferior à 0,5cm compatível com sua utilização por pulverizador (moinho de discos). Este, juntamente com uma bateria de peneiras, permite a obtenção de um produto inicial com granulação abaixo de 0,149mm (100 meshes). Este material é então introduzido na mesa vibratória onde dá-se a concentração dos minerais pesados.

O concentrado de minerais pesados proveniente da mesa vibratória, é processado em separador magnético tipo Frantz, inicialmente em posição vertical e amperagem entre 0,5 e 1,0 A, para eliminação dos minerais muito magnéticos (magnetita, biotita, anfibólios e piroxênios). A seguir, o concentrado não magnético é tratado em bromofórmio (D-2, 87g/cm<sup>3</sup>), sendo os minerais pesados reprocessados no separador isomagnético. A porção não magnética (portadora dos zircões), é então tratada em lodeto de Metileno (D-3, 33g/cm<sup>3</sup>), e o processo é repetido diversas vezes até que o concentrado final, rico em zircões, fique praticamente isento de impurezas.

Amostras ricas em pirita e apatita podem ser tratadas respectivamente com HNO<sub>3</sub> e HCl a quente. Ocasionalmente é utilizado o Licor de Clérici (D-4, 20g/cm<sup>3</sup>) para uma melhor limpeza do concentrado.

Após sucessivas lavagens com H<sub>2</sub>O tridestilada e HNO<sub>3</sub> 7N o concentrado de zircões é separado em diversas populações de suscetibilidade magnética diferente. Com o separador magnético a diferentes inclinações horizontais e sempre a mesma amperagem (1,5A) e inclinação vertical, tem-se as

frações M6, M5, M4, etc... que representam, respectivamente, populações com diferentes suscetibilidades magnéticas a tiltes de 6, 5, 4, etc...

Cada fração é então, cuidadosamente examinada em lupa binocular onde é feita a seleção e limpeza final dos concentrados de zircões. É comum que, em lugar de se limpar o concentrado de zircões estes sejam escolhidos um a um ("hand picking") até atingir-se a quantidade necessária.

Nesta fase, os zircões podem sofrer abrasão mecânica através de um sistema que envolve ar comprimido e pirita para a eliminação das porções externas que podem apresentar-se alteradas. Se for necessário, ou desejável, com este processo pode-se, inclusive, analisar-se somente a porção interna dos zircões que podem mostrar zoneamentos resultantes de histórias geológicas complexas.

#### ATAQUE QUÍMICO E SEPARAÇÃO POR TROCA IÔNICA

Este processo é efetuado colocando-se, após sua pesagem, cada população de zircões, juntamente com 0,5ml de ácido fluorídrico concentrado, em bombas de teflon que são então mantidas em jaquetas de aço durante oito dias em um forno à 180°C. Após este período, as bombas são abertas e, se os zircões estiverem completamente dissolvidos, evapora-se o HF e coloca-se 0,5ml de HCl 6N sobre o resíduo no interior da bomba. Esta é fechada e retorna ao forno por mais uma noite a 180°C.

No caso de populações de titanita e monazita o procedimento é mais simples, podendo o ataque químico ser efetuado em bombas saviflex fechadas sobre chapas aquecedoras (100 a 120°C) durante 5 dias.

Após a abertura das bombas é realizada uma aliquotagem sendo retirados 0,2ml da solução cloídrica para as análises por diluição isotópica (DI) através das quais determina-se os conteúdos de chumbo e urânia. Os 0,3ml restantes são utilizados na medição da composição isotópica do Pb (Cl), com a realização das determinações das razões isotópicas entre as massas 204, 206, 207 e 208.

Antes da deposição sobre os filamentos do espetrômetro de massa, o Pb, bem como o U, são separados entre si e das demais impurezas através

da passagem das soluções de HCl em colunas contendo resinas de trocas aniônicas AG-1-X-8 (200-400 mesh). Esse procedimento segue, com pequenas modificações, as técnicas sugeridas por T. E. Krogh (1973), utilizando-se o HCl (6N, 3N, 1N) como reagente, sendo o Pb coletado com HCl 6N e o U com H<sub>2</sub>O.

Alternativamente e, no caso da titanita prioritariamente, o processo químico utiliza-se do ácido bromídrico (HBr) para a extração do Pb.

#### ESPECTROMETRIA DE MASSA

Ao concentrado final contendo a amostra e uma gota de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> são adicionados 2 microlitros de SiO<sub>3</sub> (silica gel). A solução assim preparada é então depositada, por meio de micropipeta, sobre o centro de um filamento simples de Re, previamente degaseificado em alto vácuo e a altas temperaturas.

O espetrômetro de massa utilizado no CPGeo é da marca VG, modelo 354 termoiônico com 5 coletores (taças de Faraday) e com um detector Daly. Neste equipamento podem ser colocadas até 16 amostras que são analisadas de forma automática ou de forma semi-automática. A Fig. 3 mostra, de forma esquemática, a configuração básica de um espetrômetro de massa desse tipo onde podem ser destacados:

- *fonte*: onde os íons são gerados;
- *analisador*: onde os íons são separados em função de sua massa pela ação do campo magnético;
- *detector*: onde as correntes de íons são medidas sob a forma de tensão.

As quantidades dos 4 isótopos naturais do chumbo (204, 206, 207 e 208) e dos 2 isótopos naturais do urânia (235 e 236) podem ser calculados a partir das razões isotópicas, medidas no espetrômetro de massa, sendo  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  para o chumbo normal, ou  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  para o chumbo nos minerais de zircão. As técnicas de medição destas razões podem ser exemplificadas da seguinte maneira:

- a) Sistema de "peak jumping" – Essa técnica utiliza o salto da intensidade do campo magnético utilizando-se apenas de um detector simples que

pode ser a taça de Faraday (C) ou então de um detector de alta sensibilidade conhecido como Daly. Normalmente utiliza-se o detector Daly para amostras com pequenas quantidades de chumbo e urânio.

b) Sistema Estático – No sistema estático não ocorre mudança no campo magnético, e os íons são medidos simultaneamente com os 5 detectores (taça de Faraday). Nesta técnica de medida os ganhos dos amplificadores são previamente calibra-

dos utilizando-se uma fonte de corrente constante, e os coletores são previamente calibrados utilizando-se uma fonte de corrente constante, previamente ajustados conforme a configuração 1 da Figura 3. Para a análise de urânio utilizam-se apenas 2 coletores: C2 para o isótopo  $^{235}\text{U}$  e C1 para o isótopo  $^{238}\text{U}$ , conforme a configuração 3 da Fig. 3. Os espectros de massas dos isótopos de chumbo podem ser vistos nas Figuras 4a e 4b.

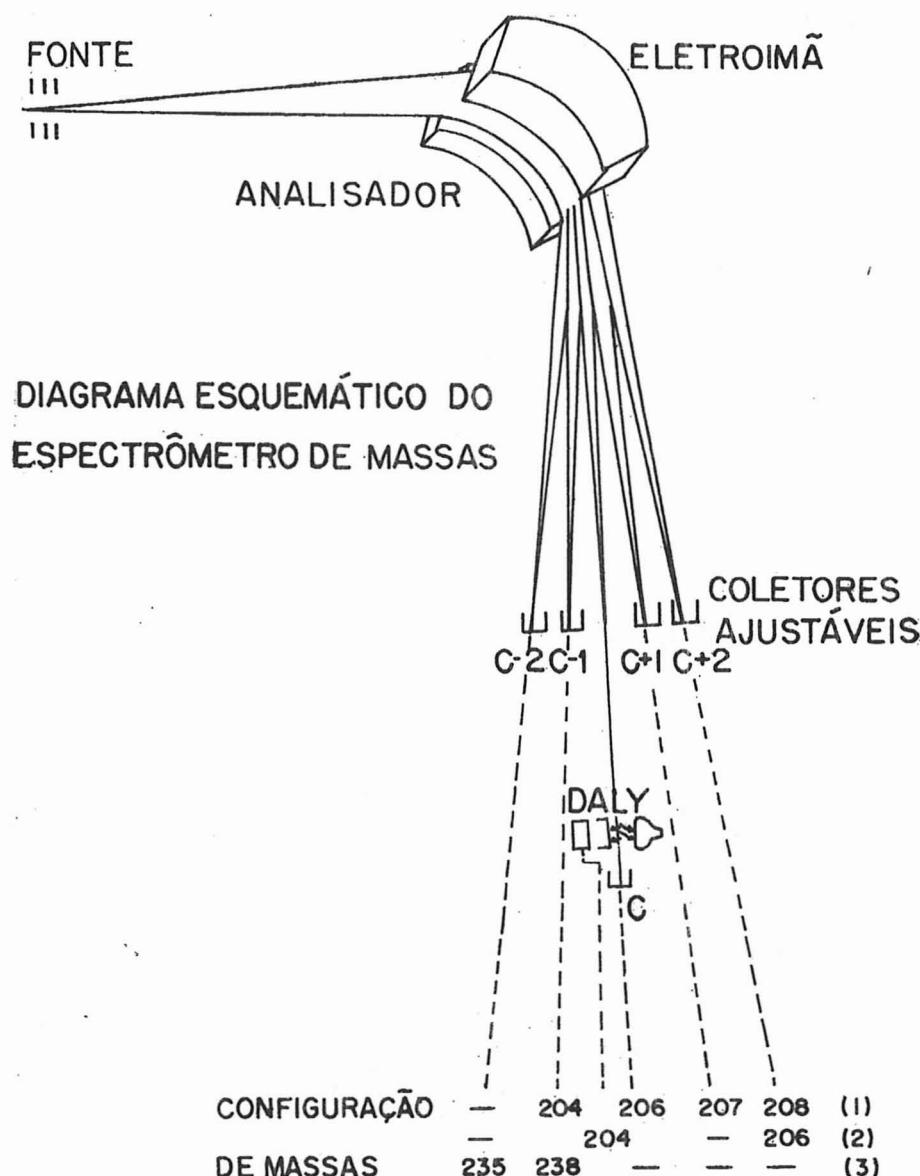


Fig. 3 — Esquema geral de um espectrômetro de massas equipado com 5 coletores de taça Faraday e um receptor tipo Daly. As medidas isotópicas são realizadas de forma estática. Os ajustes dos coletores são feitos inicialmente para os isótopos de chumbo de forma tal que o coletor C2 é usado exclusivamente para o  $^{235}\text{U}$ .

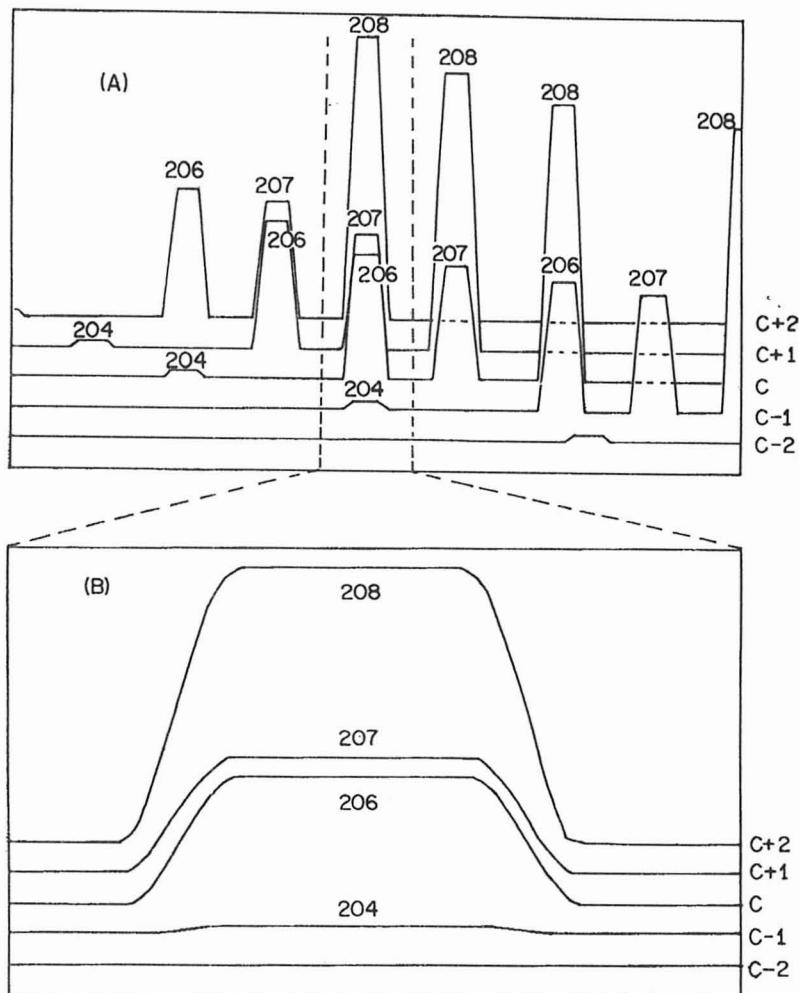


Fig. 4 — Espectro das intensidades relativas dos isótopos de chumbo. A Fig. 4a mostra as intensidades relativas dos isótopos do padrão NBS981 nos quatro coletores em uma varredura contínua entre as massas 200 e 210. Na Fig. 4b está ilustrada, em detalhe, a faixa tracejada na Fig. 4a.

c) Sistema Estático com Daly e Faraday – Em geral utilizado para as análises de amostras de zircão, onde é esperada uma concentração do  $^{204}\text{Pb}$  cerca de 1000 vezes (ou mais) inferior à dos demais isótopos. Nestes casos, a razão  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  é obtida com a medida do isótopo  $^{204}\text{Pb}$  sendo feita no detector Daly e o isótopo  $^{206}\text{Pb}$  no detector de taça de Faraday (C+2), conforme configuração 2 da Fig. 3.

O detector Daly tem uma sensibilidade 100 vezes maior que a taça de Faraday. Para exemplificar, os espectros de massa podem ser vistos nas Figs. 5a, 5b e 5c. Nas duas primeiras figuras não se observa o pico relativo ao isótopo  $^{204}\text{Pb}$  que, por possuir uma intensidade 1000 vezes menor do que

a do  $^{206}\text{Pb}$ , somente pode ser detectado com a utilização do Daly, conforme exemplificado na Fig. 5c.

Independente da técnica de medida utilizada, as medições isotópicas do chumbo requerem cuidados especiais devido ao efeito do fracionamento isotópico provocado durante a emissão termo-iônica. Em função dos isótopos  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$  serem radioativos e, somente o  $^{204}\text{Pb}$  não radioativo, os fatores de correção isotópica são calculados através dos padrões NBS981 e NBS982 que possuem razões isotópicas bem conhecidas. Para a obtenção, com a maior precisão possível, dos fatores de correção aplicáveis ao caso do CPGeo, foram efetuadas inúmeras análises desses padrões, sempre utilizando-se de quantidades conhecidas,

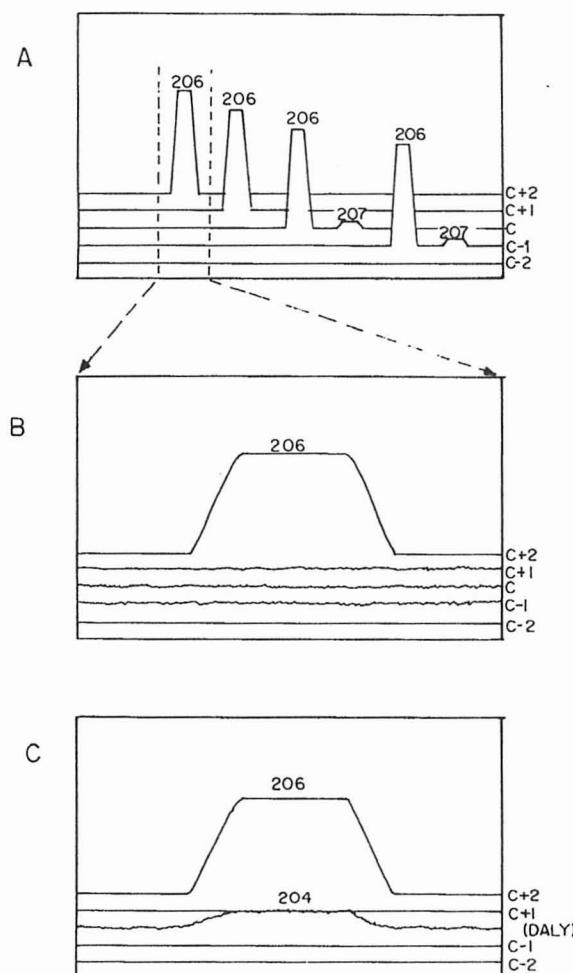


Fig. 5 — Exemplo da utilização dos coletores Faraday e Daly na leitura dos isótopos de chumbo do padrão NBS982, em uma varredura contínua entre as massas 200 e 210. No diagrama 5a os cinco coletores de taça de Faraday estão na mesma escala de intensidade de 1v, e somente os isótopos  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$  são detectados. A faixa tracejada desta figura é representada em detalhe na Fig. 5b. Os sinais dos detectores C+1, C e C-1 foram ampliados 10 vezes, mas observa-se somente o espectro de  $^{206}\text{Pb}$  em C+2. Na Fig. 5c pode-se observar o espectro de  $^{204}\text{Pb}$  devido a mudança do detector de Faraday para Daly. A diferença na escala de intensidade entre  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{204}\text{Pb}$  é de um fator 1000.

temperaturas constantes, e intervalo de tempo fixo. Os fatores de correção encontrados estão listados na Tabela I tendo sido obtidos após várias dezenas de análises em diferentes épocas.

Os resultados finais das análises espectrométricas são calculados utilizando-se o software ISO-PLOT, K. R. Ludwig (1990) disponível no CPGeo em micros PC486. Os dados analíticos resultantes são plotados em diagramas Concordia, para visualiza-

lização do grau de discordância dos zircões e para as devidas interpretações geológicas.

Alguns dos resultados obtidos no CPGeo, selecionados para serem discutidos neste artigo, estão relacionados nas Figs. 7 e 8 e 10 e 11, com os respectivos dados analíticos listados na Tabela II, sendo comentados adiante.

## RESULTADOS OBTIDOS

Os dados até agora obtidos podem ser agrupados em dois conjuntos, sendo o primeiro relacionado ao estabelecimento da rotina do laboratório, na busca da diminuição progressiva da contaminação global nas análises até níveis aceitáveis. No segundo conjunto, em que a qualidade das análises U-Pb é decorrente do primeiro, agrupam-se os resultados geocronológicos.

## PREVENÇÃO DE NÍVEIS ELEVADOS DE CONTAMINAÇÃO ANALÍTICA

A primeira fase dos trabalhos teve como meta a redução do branco do laboratório (indicativo da poluição total durante a análise) a níveis inferiores a 1 nanograma de chumbo. Para tal, foram atacados dois problemas básicos: 1) procurou-se reduzir o teor de chumbo de ambiente e dos reagentes; e 2) reformulou-se todo o procedimento de descontaminação dos materiais utilizados na análise (copos de savilex, bombas digestoras de teflon, colunas, etc.).

No caso da purificação dos reagentes, envolvendo principalmente HCl, HNO<sub>3</sub> e HF, partiu-se de produtos PA, contendo níveis de chumbo superiores a 5.000 picogramas/g. Esses reagentes, com exceção do HF, passaram por um processo de destilação em quartzo, envolvendo coluna fracionada a temperatura controlada, reduzindo o teor em chumbo a níveis de 30 picogramas/g (HCl) e 700 picogramas/g (HNO<sub>3</sub>).

A água utilizada sofre um processo inicial de destilação para então ser bi- e tri-destilada em sistema totalmente de quartzo, atingindo níveis de chumbo da ordem de 160 picogramas/g. Os passos seguintes envolvem sua passagem em de-ionizador, e também no "subboiling" que reduzem o teor de chumbo a níveis de 40 picogramas/g.

TABELA I

Fatores de correção do fracionamento com base na análise dos padrões NBS982, NBS983 e NBS981. Para cada análise foram medidas de modo estático, no mínimo 50 razões, utilizando-se os coletores de Faraday segundo a configuração nº 1 da Fig. 3. Nos fatores de correção estão embutidos os erros das calibrações, dos ganhos dos amplificadores, de contaminações em geral (na deposição, descontaminação dos filamentos e da fonte onde se obriga o filamento) e do efeito do fracionamento isotópico produzido durante a emissão termoionica. Este último fator entra com peso maior no cálculo do fator de correção. Para o padrão NBS983 não foram calculados os fatores de correção devido a alta sensibilidade aos componentes contaminantes.

Padrão	Amostra (nanogramas)	Número de análises	Pb204/Pb206		Pb207/Pb206		Pb208/Pb206	
			Razão média	Fator de correção	Razão média	Fator de correção	Razão média	Fator de correção
NBS 982	200-400	20	0.02727(3)	0.99813	0.4663(2)	1.00164	0.9967(5)	1.00343
	20-40	40	0.02730(4)	0.99703	0.4665(4)	1.00121	0.9976(5)	1.00253
	2-4	7	0.02738(3)	0.99412	0.4669(4)	1.00356	0.9992(5)	1.00092
			0.027219	1.00000	0.46707	1.00000	1.00012	1.00000
valores esperados								
NBS 983	200	4	0.000365		0.07120		0.013593	
	20	6	0.000371		0.71221		0.013650	
	2-4	1	0.000375		0.07109		0.013654	
			0.000365	1.00000	0.71201	1.00000	0.013619	1.00000
valores esperados								
NBS 981	200	2	0.059187(40)	0.9976	0.91335(70)	1.00137	2.16008(8)	1.00333
valores esperados			0.059042	1.00000	0.09146	1.00000	2.168	1.00000

O processo final de purificação dos reagentes é efetuado com a destilação dos mesmos em tubos de teflon interconectados sob um sistema de lâmpadas aquecedoras, onde o reagente (HCl, HF, HNO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>O) evaporado do lado aquecido é coletado na outra extremidade que está permanentemente resfriada com água corrente. Para alguns reagentes este processo é repetido.

O procedimento de descontaminação de materiais é atualmente realizado individualmente em chapas aquecedoras à 60-70°C, utilizando-se os mesmos reagentes disponíveis para os ataques químicos. O processo envolve dois dias em HF, dois dias em HNO<sub>3</sub> e três etapas de dois dias em HCl 6N, sendo utilizada água tri-destilada entre cada uma das etapas.

Durante o processo de instalação da metodologia as purificações efetuadas nos reagentes indicaram um decréscimo significativo dos teores de

chumbo contaminante, fato este que refletiu a evolução das condições do laboratório U-Pb do CPGeo. A tabela abaixo relaciona os valores atuais do Pb contaminante, em picogramas/grama obtidos da média de diversas análises nos três ácidos empregados e na água, após a destilação dos mesmos nos tubos de teflon:

HCl .....	6
HNO <sub>3</sub> .....	6
HF.....	9
H <sub>2</sub> O.....	8

Atualmente, os valores de chumbo desses reagentes encontram-se muito próximos aos obtidos nos melhores laboratórios internacionais.

Os teores em Urânio medidos no HCl são da ordem de 0,018 picogramas/g, no HF de 0,005 picogramas/g e na H<sub>2</sub>O da ordem de 0,009 picogramas/g.

**TABELA II**  
Dados analíticos das amostras estudadas.

Fração Magnética	Concentrações		Razão Medida	Razões Calculadas (*-Isótopos Radiogênicos)			Idades (Milhões de anos)		
	Urânio (ppm)	Chumbo (ppm)		206Pb*/ 238U	207Pb*/ 235U	207Pb*/ 206Pb*	206Pb/ 238U	207Pb/ 235U	207Pb/ 206Pb
<b>Granito Corupá</b>									
M2	125	14.0	0.002381	0.08197	0.67025	0.059306	508	520	578
M2	125	14.0	0.002381	0.08197	0.67025	0.059306	508	520	578
M3	200	20.3	0.002250	0.07300	0.59783	0.059395	454	475	582
M4	459	37.9	0.001827	0.04692	0.38424	0.059400	296	330	582
NM2	95	11.1	0.003484	0.09059	0.74183	0.059392	559	564	582
<b>Granito Agudos do Sul</b>									
M5	1498	83.5	0.001621	0.04622	0.37365	0.058626	291	322	553
M3	1139	68.4	0.001353	0.05133	0.41563	0.058729	323	352	557
M2	1091	73.4	0.001193	0.05825	0.47486	0.059121	365	394	572
M1	689	49.4	0.001023	0.06441	0.52572	0.059194	402	429	574
<b>Mangeritos de S. J. do Rio Pardo</b>									
M6	260	28.8	0.002523	0.10021	0.83541	0.060465	616	617	620
M5	231	25.2	0.001859	0.09965	0.83287	0.060621	612	615	626
M4	242	26.7	0.001537	0.10225	0.85354	0.060543	628	627	623
M3	275	29.4	0.001012	0.09997	0.83762	0.060768	614	618	631
M3r	266	28.1	0.000969	0.10040	0.83953	0.060647	617	618	627
<b>Chamockitos de Muzambinho (Pedreira Cantiére)</b>									
M2	616	64.3	0.000837	0.09627	0.80741	0.060827	592	601	633
M1	559	61.6	0.000796	0.10034	0.84694	0.061217	616	623	647
M-1	490	54.3	0.000877	0.09956	0.083482	0.060816	612	616	633
M-2	442	50.7	0.001226	0.10040	0.84434	0.060992	617	622	639
M-3	429	46.8	0.000410	0.10071	0.85424	0.061618	619	627	657
NM-3	447	66.9	0.005461	0.10292	0.86937	0.061261	631	635	648

As idades que serão discutidas adiante, foram efetuadas em populações de grãos de zircão, com a utilização de aproximadamente 1 miligrama, visando obter-se quantidades de chumbo radiogênico que tornassem desprezíveis possíveis interferências do chumbo contaminante. A manutenção dos valores atuais de branco dos reagentes, ou mais provavelmente, sua diminuição para níveis ainda mais baixos, permitirá uma redução drástica nas quanti-

dades de material a ser utilizada nas futuras análises.

#### DADOS GEOCRONOLÓGICOS

Como poderá ser visto a seguir, os resultados obtidos, pelo método U-Pb em zircão, em termos de idade radiométrica, foram em geral bem mais precisos do que os dados anteriormente disponíveis por outras metodologias (Rb-Sr e K-Ar).

O melhor estimador da intensidade de contaminação de uma análise é a razão  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  medida. Valores altos indicam grande quantidade do isótopo  $^{204}\text{Pb}$  que, por não ser radiogênico é, em sua maior parte, proveniente da contaminação analítica. São mais confiáveis aqueles valores que possuam razões  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  mais baixas, da ordem de milésimos.

#### GRANITÓIDES PARANAENSES

Diversos autores tem estudado, sob o ponto de vista geocronológico, os terrenos Pré-Cambrianos a Eo-Paleozóicos do sudeste paranaense e nordeste catarinense. Destacam-se os artigos de Cordani e Kawashita (1971); Hartmann (1981); Kaul & Teixeira (1982); Siga Jr. *et al.* (1990,

1993); Basei *et al.* (1990) e Machiavelli *et al.* (1991).

Para os estudos geocronológicos U-Pb, em sua fase inicial, escolheu-se um problema geológico conhecido, de interpretação relativamente fácil, evitando-se a aplicação da metodologia em rochas metamórficas complexamente deformadas e de história policíclica. Por esta razão decidiu-se estudar os granitóides não deformados da Suite Serra do Mar (Kaul, 1984, 1985). Foram assim analisados dois corpos de granitóides (Agudos do Sul e Corupá) da Suíte Serra do Mar cuja localização encontra-se no mapa geológico da Figura 6. Os granitóides escolhidos já contavam com dados geocronológicos anteriores (Rb/Sr e K/Ar), o que possibilitou uma interpretação mais completa no tocante a sua evolução geológica.

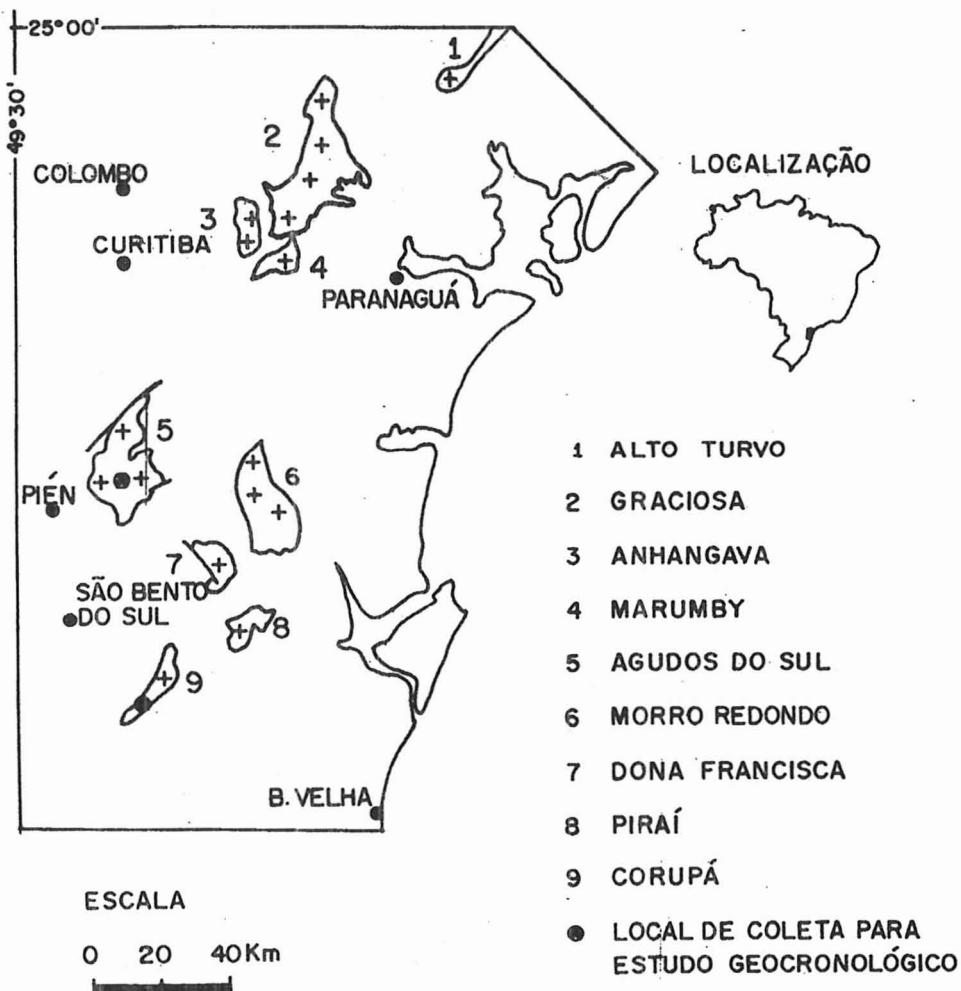


Fig. 6 — Distribuição dos granitóides da Suite Serra do Mar entre Curitiba (PR) e Barra Velha (SC).

Os maciços graníticos Agudos do Sul e Corupá representam, junto a inúmeros outros corpos (Graciosa, Anhangava, Marumby, Serra da Igreja, Dona Francisca, Piraí do Sul, Morro Redondo e Estrela) importante atividade plutônica de características tardia-pós-tectônicas.

Suas fácies petrográficas principais mostram, em geral, texturas granulares, hipidiomórficas, contendo, em proporções variadas, quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, biotita, anfíbólio e, mais raramente, clinopiroxênio e faialita. Os acessórios principais são titanita, zircão, apatita e fluorita. Como produtos de alteração ocorrem normalmente carbonato, clorita, moscovita e epídoto.

Alguns maciços, mostram variedades sienito-graníticas. Os minerais máficos indicam tendências evolutivas desde francamente metaluminosas até claramente peralcalinas. Nessa evolução tem-se a presença de faialitas e clinopiroxênios (aegirina-augita), que mostram-se por vezes bordejados por anfíbólios cálcico-sódicos, até totalmente sódicos (riebeckitas).

**Granito Corupá:** O estudo geocronológico U-Pb desse maciço envolveu a análise de quatro frações de zircões com diferentes susceptibilidades magnéticas. Esses dados, quando tratados em diagramas Concórdia, apresentaram-se bem distribuídos e alinhados. Neste exemplo, uma das frações

analisadas posicionou-se praticamente sobre a curva Concórdia, denotando não ter sofrido perda de chumbo. O ponto analítico, fixa muito bem o intercepto superior e tendo em vista também o bom alinhamento das demais frações, define um erro experimental bastante eixo. A idade obtida de 580 +/- 6 Ma (Fig. 7) é interpretada como indicativa da época de cristalização dos zircões e, portanto, da formação desse maciço granítico.

Adicionalmente foram realizados estudos geocronológicos utilizando-se a metodologia Rb-Sr. Os pontos analíticos alinharam-se em diagrama isocrônico caracterizando idade de 550 +/- 26 Ma para uma razão inicial de 0,707 +/- 0,001 (Siga Jr. *et al.*, no prelo). Os resultados K-Ar obtidos em anfíbólios desse granito indicaram idades próximas de 530 +/- 20 Ma (Siga Jr. *et al.*, *op. cit.*), indicando a época onde o corpo resfriou-se abaixo da isoterma de 500°C.

Tais resultados obtidos para o granito Corupá estão de acordo com o que se conhece das metodologias empregadas. Em geral, as idades obtidas através da sistemática U-Pb mostram-se pouco maiores do que os resultados Rb-Sr. Tal fato sugere que as trocas iônicas em termos de Rb e Sr ainda continuaram a ocorrer após o fechamento isotópico do sistema U-Pb.

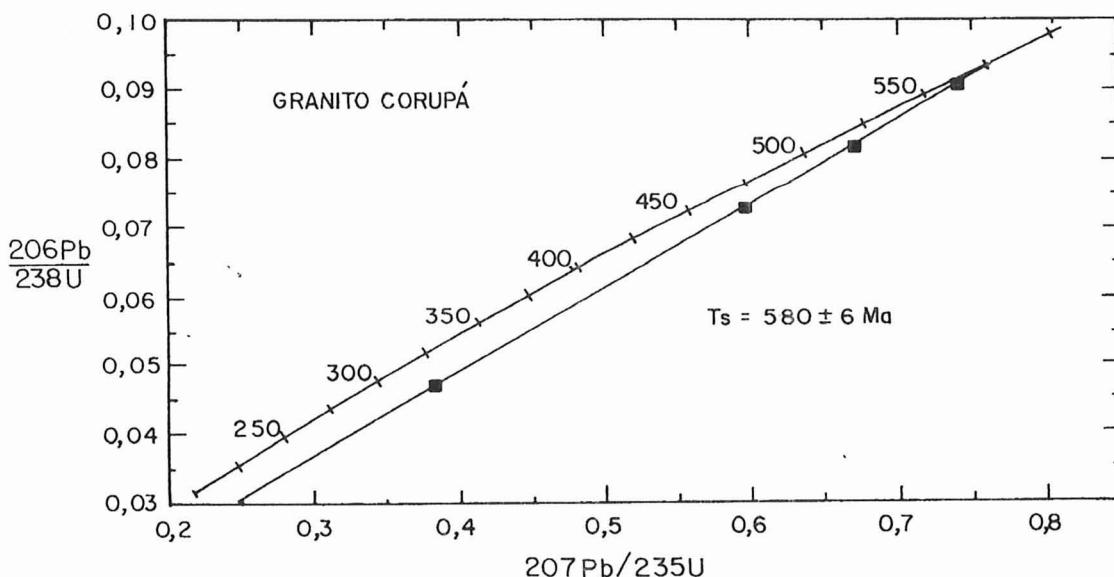


Fig. 7 — Diagrama Concórdia para o Granito Corupá.

**Granito de Agudos do Sul:** Para o maciço de Agudos do Sul, foram analisadas quatro frações de zircões que, em diagrama Concórdia, indicaram para a cristalização desses minerais a idade de  $594 \pm 26$  Ma (Fig. 8).

Neste exemplo, os pontos analíticos posicionaram-se relativamente afastados da curva Concórdia, apresentando também certa dispersão em relação a reta Discórdia. Por causa disso, o erro experimental é mais elevado. Trata-se de um caso onde estudos adicionais devem ser realizados, se for necessário obter uma precisão melhor, envolvendo a abrasão dos zircões na tentativa de aproximá-los da curva Concórdia. Tal procedimento, acoplado a análises de esfenos e monazitas propiciaria maior precisão na fixação do intercepto superior e, portanto, da idade obtida.

A idade isocrônica Rb-Sr obtida para esses granitóides, de  $570 \pm 22$  Ma para uma relação inicial de  $0,7073 \pm 0,0008$  (Siga Jr. *et al.*, no prelo), mostra-se novamente pouco menor do que a obtida através da metodologia U-Pb embora os valores possam ser considerados até concordantes, dentro dos erros experimentais. Os dados K-Ar, efetuados em biotitas, revelaram valores da ordem de  $540 \pm 28$  Ma (Siga Jr. *et al.*, *op. cit.*), caracterizando épocas relativas ao resfriamento desse corpo abaixo da isoterma de  $300^{\circ}\text{C}$ .

#### ROCHAS DE ALTO GRAU DA NAPPE SOCORRO-GUAXUPÉ

A Nappe Socorro-Guaxupé (Campos Neto *et al.*, 1984; Campos Neto, 1991) representa a principal megaestrutura do Neoproterozóico reconhecida na porção NNE paulista e SSE mineira, cuja estabilidade tectônica somente foi atingida no início do Paleozóico Inferior. Trata-se de uma estrutura alótone que afetou níveis crustais profundos expondo uma pilha com vários quilômetros de rochas ortodiradas, do Neoproterozóico, onde são freqüentes corpos de composição calci-alcalina a hiperstênio. Em meio às rochas ígneas regionais são encontradas ocorrências de rochas metassedimentares e ígneas de idades maiores.

Os estudos geocronológicos anteriores efetuados por diversos autores, onde se destacam Oliveira *et al.* (1986); Artur (1988); Tassinari (1988); Campos Neto *et al.* (1988) e Campos Neto (1991), indicam, principalmente através da utilização da metodologia Rb-Sr, o intervalo entre 830 e 650 Ma como a principal época para o desenvolvimento da história ígnea e metamórfica da Nappe Socorro-Guaxupé. Alguns valores mais antigos foram obtidos, mas seu significado geológico, como será discutido adiante, ainda não se encontra bem definido.

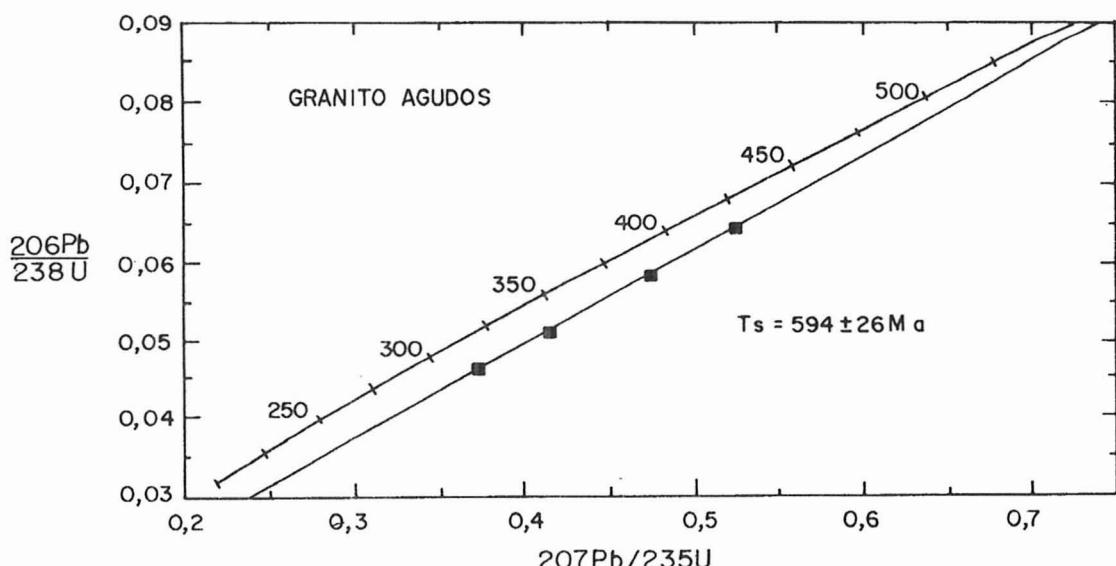


Fig. 8 — Diagrama Concórdia para o Granito Agudos do Sul.

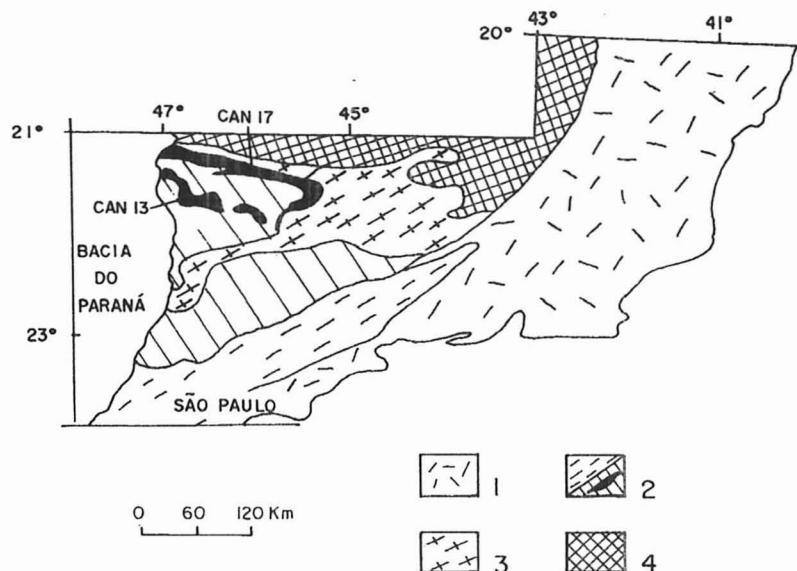


Fig. 9 — Esboço Geológico da Nappe Socorro-Guaxupé (simplificada de Campos Neto, 1991), com destaque para: 1) Terrenos da Orogênese Rio Doce; 2) Terrenos da Orogênese Brasiliiana (tracejado – Faixa Apiaí e Complexo Embu; barras inclinadas – Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé com lascas granulíticas em preto); 3) Terrenos da Orogênese Uruaçuana e, 4) Terrenos Arqueano-Proterozoico Inferior (Cráton do São Francisco).

Os dados K-Ar, obtidos em biotitas ao longo da Nappe, distribuem-se entre 680 e 480 Ma, com uma concentração maior ao redor de 550 +/- 10 Ma. Ao intervalo entre 550 e 480 Ma é atribuído o resfriamento dos terrenos da orogênese Rio Doce superimpostos tectonicamente aos terrenos brasilianos da Nappe. Resultados anteriores a 550 Ma são atribuídos a aberturas parciais do sistema K-Ar, fato este bem evidenciado pelos resultados dos anfibólios que atingem valores da ordem de 780 Ma.

Verifica-se que, neste caso, os problemas geológicos regionais são bem mais complexos do que aqueles relativos aos granitóides da Suite Serra do Mar, e as potencialidades do método U-Pb poderiam ser testadas.

Os estudos U-Pb efetuados na Nappe concentraram-se nas localidades de São José do Rio Pardo (SP) e Muzambinho (MG) em rochas mangerito-charnockíticas cujas localizações acham-se representadas na Figura 9.

**Mangeritos de São José do Rio Pardo:** Foram analisados 4 frações de zircões extraídos da porção mangerítica da Suite Mangerito-Granítica S. J. do Rio Pardo (Campos Neto *et al.*, 1988). As

rochas analisadas caracterizam-se petrograficamente como quartzo mangeritos verde-acinzentados, foliados, que transicionam para hornblenda granitos róseos.

O resultado obtido de 625 +/- 7 Ma (Fig. 10) foi definido pelo posicionamento dos pontos analíticos agrupados e próximos a curva Concórdia, o que explica o baixo erro experimental encontrado. Uma das frações analisadas situa-se pouco acima da curva o que pode indicar pequena perda em urânio.

A idade obtida está de acordo com os dados geocronológicos regionais, e encontra suporte em determinações Pb-Pb efetuadas no Instituto Max Plank, Alemanha, em monozircões retirados das mesmas frações analisadas no CPGeo em São Paulo. Neste caso pelo método de evaporação do cristal diretamente sobre o filamento, foi obtida a idade de 630 +/- 16 Ma (A. Kröner, inf. verbal).

**Granulitos da Pedreira Cantiére:** A pedreira Cantiére está incluída numa unidade regional de rochas da fácie granulito previamente estudadas, entre outros, por Ebert (1968, 1971) e Cavalcante *et al.* (1979). Tais rochas apresentam-se como corpos com comportamento subhorizontal, dobrados,

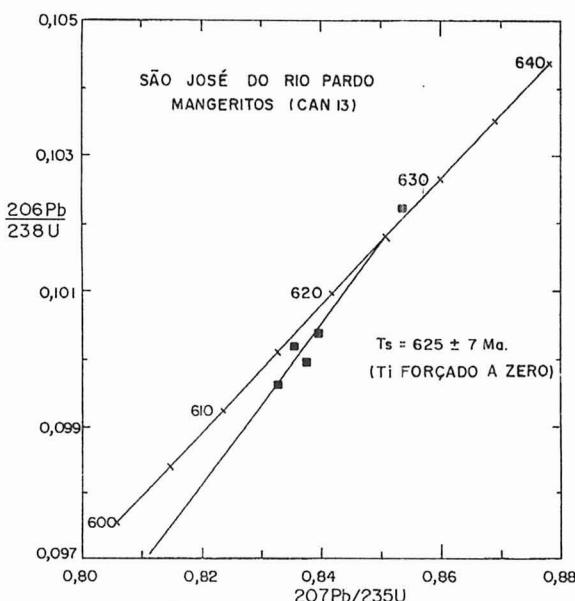


Fig. 10 — Diagrama Concórdia para o Mangerito de São José do Rio Pardo (SP).

com intensa foliação milonítica. O bandamento composicional é uma feição marcante onde se destaca a alternância de níveis charnockíticos com bandas de granulitos básicos. Os zircões estudados foram extraídos da porção charnockítica.

A idade U-Pb foi calculada a partir da análise de seis frações de zircão cujos pontos analíticos se distribuíram ao longo da reta Discórdia. O inter-

cepto superior indicou idade de 643 +/- 12 Ma (Fig. 11).

Alguns cristais de zircão desta mesma amostra foram, como no caso anterior, datados no Max Plank e forneceram valores Pb-Pb de 666 +/- 14 Ma (A. Kröner, cit. verbal), valor concordante ao obtido nessas mesmas rochas pelo método Rb-Sr em rocha total (M. Figueiredo, cit. verbal).

Os resultados U-Pb aqui apresentados para as rochas da Nappe Socorro-Guaxupé são aqui interpretados como indicativos da época do metamorfismo regional de alto grau, que afetou essas rochas pouco após sua colocação como corpos ígneos.

A concordância geral dos valores de idade, e em especial aquela das idades U-Pb e Rb-Sr para as rochas da região de Muzambinho (pedreira Cantieré), próximas à base da Nappe, sugere que a referida época, próxima de 650 Ma, estaria associada ao metamorfismo de alto grau gerador da principal foliação observada nessas rochas.

Para os mangeritos de São José do Rio Pardo, a grande discrepância entre a idade dos zircões e o valor de 1200 Ma obtido pela isócrona Rb-Sr em rocha total (Campos Neto *et al.*, 1988), para rochas do mesmo afloramento, apresenta um grande problema de interpretação. A concordância entre as determinações pelos métodos de Pb, lhes confere maior credibilidade e, na opinião dos presentes au-

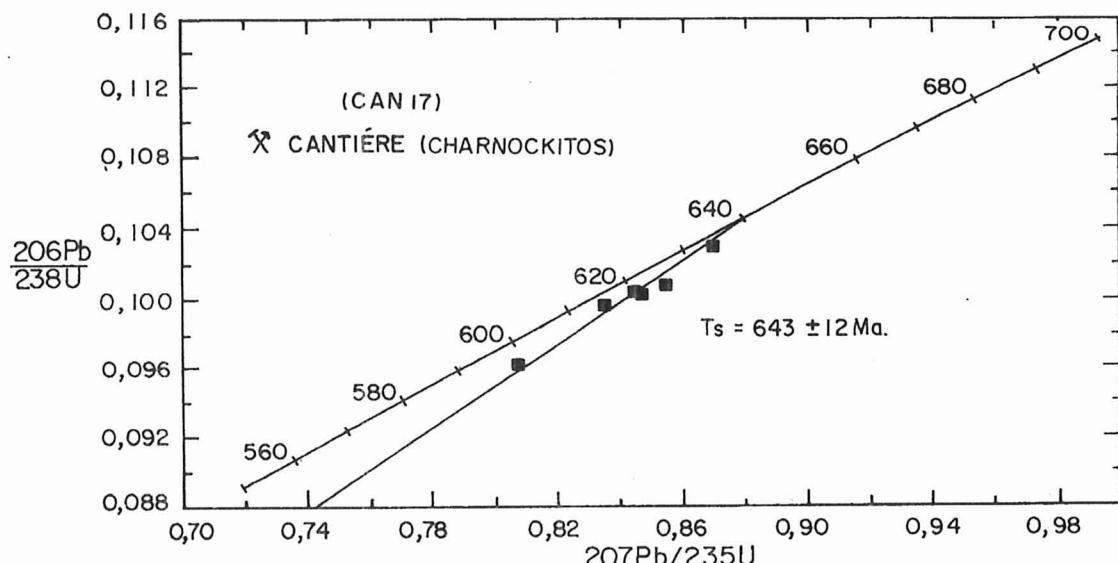


Fig. 11 — Diagrama Concórdia para a porção charnockítica dos granulitos da região de Muzambinho (MG).

tores, representariam a idade do metamorfismo de alto grau.

Nesse caso, os valores Rb-Sr, poderiam não apresentar significado geológico e, a isócrona apresentada seria falsa. Uma segunda alternativa, que explicaria os dados Rb-Sr mais antigos, diz respeito ao fato de ser freqüente, em terrenos de médio e alto grau, a preservação do registro de eventos anteriores ao metamorfismo, no caso de métodos que se utilizam de análises em rocha total, possivelmente devido à baixa mobilidade dos elementos em processos que ocorrem relativamente a seco. Por outro lado, análises em minerais isolados (caso dos zircões) ou se referem a minerais metamórficos neoformados, ou dificilmente escapam ao rejuvenescimento isotópico provocado pela abertura do sistema, em altas temperaturas.

#### TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos permitem considerar-se como terminada a fase de implantação da metodologia U-Pb nos laboratórios do CPGeo. O que se pretende atualmente, a nível metodológico, é o aprimoramento dessa sistemática até atingir-se níveis de branco de laboratório suficientemente baixos para permitir a análise de monocristais de zircão.

O domínio de tal rotina analítica permitirá sua oferta à comunidade geológica interessada, aumentando significativamente a capacidade metodológica e interpretativa do CPGeo.

#### AGRADECIMENTOS

Ao professor W. R. Van Schmus (Kansas University, USA) os autores agradecem por sua participação direta nos trabalhos e por todos os ensinamentos, auxílios materiais e incentivos recebidos durante todas as etapas da implementação da metodologia Urânio-Chumbo nos laboratórios do Centro de Pesquisas Geocronológicas do IGUSP.

Os autores expressam igualmente seus agradecimentos aos colegas do CPGeo, Professores Umberto G. Cordani, Koji Kawashita, Wilson Teixeira, Colombo C. G. Tassinari e Benjamin B. B. Neves pelas sugestões e incentivos recebidos desde o início dos trabalhos. Em especial, agradecem à

química Liliane Petronilho por sua efetiva participação na fase inicial da rotina analítica e à matemática Ivone Sonoki pela adequação dos softwares aos micros disponíveis no CPGeo.

À FAPESP (processos 87/0388-2; 88/3805-6; 91/3446-9 e 92/3467-9) e a FINEP/PADCT (processo 43870954.00) os autores agradecem os auxílios financeiros recebidos sem os quais teria sido impossível a implantação da metodologia Urânio-Chumbo no Brasil.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, L. H., (1955), The convergent lead ages of the old monazites and uranites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 7: 294.
- ARTUR, A. C., (1988), Evolução policíclica da infraestrutura da porção sul do Estado de Minas Gerais e regiões adjacentes do Estado de São Paulo. Tese de Doutoramento, IG-USP, São Paulo, 231p. (inédito).
- BASEI, M. A. S.; SIGA JUNIOR, O. & REIS NETO, J. M., (1990), O Batolito Paranaguá: Proposição, Idade, Considerações Petrogenéticas e Implicações Tectônicas. In: *Congr. Bras. Geol.*, 36, Natal, 1990. Anais... RN, SBG, V. 4, p. 1684-1699.
- CAMPOS NETO, M. C.; BASEI, M. A. S.; ALVES, F. R. & VASCONCELLOS, A. C. B. C., (1984), A Nappe de Cavalgamento Socorro (SP-MG): In: *Congr. Bras. Geol.*, 33, Rio de Janeiro, 1984. Anais... RJ, SBG, v. 4, p. 1809-1822.
- CAMPOS NETO, M. C.; FIGUEIREDO, M. H. C.; JANASI, V. A.; BASEI, M. A. S. & FRYER, B. J., (1988), The São José do Rio Pardo Mangeritic-granitic suite, Southeastern Brazil. *Geochim. Brasil.*, 2 (2): 185-189.
- CAMPOS NETO, M. C., (1991), A porção ocidental da faixa Alto Rio Grande. Ensaio de evolução tectônica. Tese de Doutoramento, IG-USP, São Paulo, 210p.
- CAVALCANTE, J. C.; CUNHA, H. C. S.; CHIERAGATI, L. A.; KAEFER, L. Q.; ROCHA, J. M.; DAITX, E. C. & RAMALHO, R., (1979), Projeto Sapucaí. Relatório Final, MME/DNPM, Série Geológica 4, Secção Geológica Básica 2, 229p.
- CORDANI, U. G. & KAWASHITA, K., (1971), Estudo geocronológico pelo método Rb-Sr, de rochas intrusivas no Grupo Açuengui. In: *Congr. Bras. Geol.*, 25, São Paulo, SP, 1971. Anais... SP, SBG, v. 1, p. 105-110.

- EBERT, H., (1968), Ocorrências da fácie granulítica no sul de Minas Gerais e áreas adjacentes, em dependência da estrutura orogênica: hipóteses sobre sua origem. *An. Acad. Bras. Ci.*, **40** (supl.): 215-229.
- EBERT, H., (1971), Os Paraibides entre São João del Rei, Minas Gerais e Itapira, São Paulo, e a bifurcação entre Paraibides e Araxáides. In: *Congr. Bras. Geol.*, 25, São Paulo, 1971. Resumo Comun. São Paulo, SBG, *Bol. Esp.*, **1**: 177-178.
- HARTMANN, L. A., (1981), Petrogênese dos granulitos e ultramafitos de Luis Alves (SC). Tese de Doutoramento, UFRGS, 104p., (inédito).
- KAUL, P. F. T., (1985), Magmatismo e evolução da crosta no sul-sudeste do Brasil durante o Proterozóico Superior e Eopaleozóico. In: *Simpósio Sul Brasileiro de Geologia*, 2, Florianópolis, SC, Anais..., 126-127.
- KAUL, P. F. T. & TEIXEIRA, W., (1982), Archean and Early Proterozoic complexes of Santa Catarina, Paraná, and São Paulo States, South-southeastern, Brazil: an outline of their geological evolution. *Rev. Bras. Geoc.*, São Paulo, SBG, **12** (1/3): 172-182.
- KROGH, T. E., (1973), A low contamination method for decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**: 485-494.
- LUDWIG, K. R., (1990), ISOPLOT, A Plotting and Regression Program for Radiogenic-Isotope Data, for IBM-PC Compatible Computers. Version 2.11: U. S. Geological Survey Open-File Report 88-557, 33 p.
- MACHIAVELLI, A.; BASEI, M. A. S. & SIGA JR., O., (1991), Geoquímica e Geocronologia dos granitóides deformados da região de Pien (PR). Provável arco magmático do Proterozóico Superior. In: *Congr. Bras. de Geoq.*, 3, São Paulo, SP. *Resumos*, **1**: 249-253.
- OLIVEIRA, M. A. F.; KAWASHITA, K.; KIARA, Y. & DELHAL, J., (1986), Novos dados geocronológicos para rochas charnockíticas da Associação Guaxupé, Complexo Varginha. *Rev. Bras. Geoc.*, **16** (3): 301-305.
- SIGA JR., O.; BASEI, M. A. S. & KAWASHITA, K., (1990), Perfil Térmico K-Ar através do Maciço de Joinville (PR-SC) e do Cinturão Dom Feliciano (SC). Implicações Tectônicas. In: *Congr. Bras. de Geol.*, 36, Nata, RN, Anais..., SBG, **6**: 2773-2785.
- SIGA JR.; BASEI, M. A. S. & MACHIAVELLI, A., (1993), Modelagem geocronológica do setor NE de Santa Catarina e SE do Paraná, Brasil. Trabalho aceito para publicação na Revista Brasileira de Geociências (no prelo).
- STEIGER, R. H. & JAÉGER, E., (1977), Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in Geo and Cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **36**: 359-362.
- TASSINARI, C. C. G., (1988), As idades das rochas e dos eventos metamórficos da porção sudeste do Estado de São Paulo e sua evolução crustal. Tese de Doutoramento, IG-USP, São Paulo, 236p. (inédito).
- WETHERILL, G. W., (1956), Discordant uranium lead ages. *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **37**: 320-326.