



## Dosimetria da radiação cósmica por espectroscopia-gama e datação de depósitos cenozóicos da porção central da bacia hidrográfica do rio Paraná (MS, PR e SP)

A.E.M. Sallun<sup>1,2</sup>, K. Suguio<sup>2,3</sup>, S.H. Tatumi<sup>4</sup> & M. Yee<sup>4,5</sup>

1 Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Avenida Miguel Stéfano, 3900 - 04301-903, São Paulo, SP, aletheamartins@hotmail.com

2 Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562 - 05508-080, São Paulo, SP, kenitirosuguio@hotmail.com

3 Centro de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão (CEPPE), Universidade Guarulhos (UnG), Rua Dr. Nilo Peçanha, 81 (Prédio U - 6º andar) - 07023-070, Guarulhos, SP

4 Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Praça Cel. Fernando Prestes, 30 - 01124-060 - São Paulo, SP, tatumi@fatecsp.br

5 Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Avenida Professor Mello Moraes, 2463, 05508-900, São Paulo, SP, marcioye@usp.br

**Abstract** Cenozoic sedimentary deposits of the Paraná river hydrographic basin are being dated by Thermoluminescence (TL) and Optically Stimulated Luminescence (OSL) methods, with the objective of identifying different colluviation phases. To obtain more believable ages, in situ measurement of cosmic radiations incident in the study area has been done, because ages obtained through these methods are inversely proportional to these radiations doses. The measurement was made in a boat upon Paraná river in Presidente Epitácio (São Paulo, state) due to water depth, which is sufficient to avoid radiation derived from soil radioactive substances. An average value of 174.22  $\mu\text{Gy/year}$  of cosmic radiation has been obtained, instead of the theoretical value 209.85  $\mu\text{Gy/year}$ , because seasonal variables (climate, period of the year etc.) are neglected in theoretical calculations, but considered in experimental estimates. The obtained data showed a necessity of new measurements also in other regions of Brazil to get more accuracy in TL and OSL ages, because theoretical values can introduce errors in the obtained values.

**Keywords:** luminescence dating, cosmic radiation, cenozoic deposits, Paraná river hydrographic basin.

**Palavras-chave:** datações por luminescência, radiação cósmica, depósitos cenozóicos, bacia hidrográfica do alto rio Paraná.

**INTRODUÇÃO** Datações absolutas por termoluminescência (TL) e luminescência opticamente estimulada (LOE) têm sido empregadas para compreender melhor os depósitos cenozóicos que ocorrem extensivamente na porção central do alto Paraná da bacia hidrográfica do rio Paraná, em parte das regiões centro-oeste, sudeste e sul do Brasil (Fig. 1). Esses depósitos testemunham importantes eventos geológicos ocorridos nessa região do país, mas as descrições e interpretações disponíveis são muito vagas e/ou desconhecidas e precisam ser melhoradas com base em dados quantitativos, para melhor elucidar a história geológica da área de estudo.

Esses métodos têm demonstrado grande potencialidade na datação de depósitos siliciclásticos quaternários, permitindo o estudo de amostras sem restos orgânicos e alcançando idades muito mais antigas, até cerca de um milhão de anos, cobrindo parte importante do Pleistoceno.

Os depósitos sedimentares recebem radiações ionizantes a partir de raios cósmicos, da desintegração

de isótopos radioativos naturais, e a exatidão desses valores são de extrema importância para se obter valores mais confiáveis, já que a idade de amostras datadas por TL/LOE é inversamente proporcional à dose da radiação cósmica incidente no local.

Dessa forma, este trabalho foi desenvolvido para a medição *in situ* da radiação cósmica incidente na porção central da área de estudo, na região de Presidente Epitácio (SP), para o cálculo das idades dos depósitos.

No Brasil foram feitas inicialmente medidas da dose da radiação cósmica incidente abaixo de linhas de transmissão de energia elétrica (linha Itaberá-Tijucu Preto de 750 kV da FURNAS em São Paulo). Foi verificado que as linhas de transmissão desviam os fluxos da radiação cósmica diminuindo seu valor (Oliveira 2003). Porém, nunca haviam sido feitas medidas de radiação cósmica mais confiáveis para serem usadas em datações por TL e LOE.

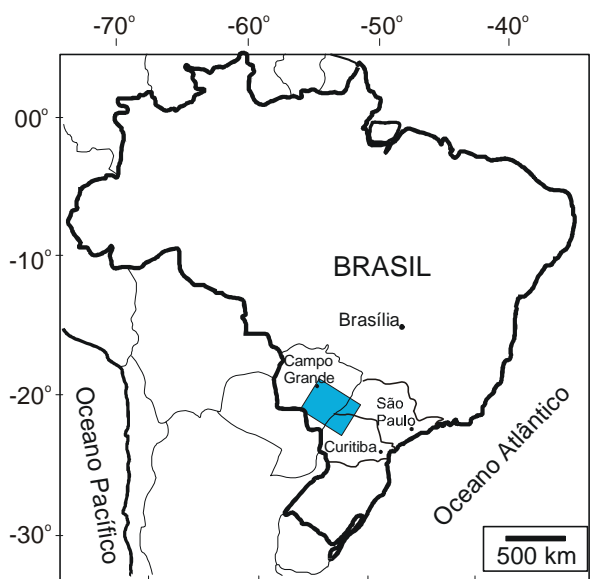


Figura 1. Situação geográfica da área de estudo e sua localização no Brasil

**MÉTODO DE DATAÇÃO ABSOLUTA** A TL e LOE são propriedades físicas de materiais cristalinos ou vítreos, previamente irradiados com radiações ionizantes (raios cósmicos e isótopos radioativos), de emitir luz quando são aquecidos até determinadas temperaturas (TL) ou quando são estimulados opticamente (LOE). Os métodos de datação por TL e LOE são baseados na teoria da interação das radiações com a matéria, pois se baseia no fato de que a idade do material a ser datado pode ser calculada pela medida das concentrações de *defeitos* induzidos no material por radiações ionizantes.

Materiais geológicos e arqueológicos compostos de alguns minerais (calcita, fluorita, quartzo etc.) e fragmentos de cerâmica, recebem radiações ionizantes (radiações  $\beta$  e  $\gamma$ , partícula- $\alpha$ ) provenientes dos raios cósmicos e da desintegração de isótopos radioativos naturais como o  $U^{235}/U^{238}$ ,  $Th^{232}$ ,  $K^{40}$  e seus filhos radioisótopos, que se encontram no seu interior ou nas vizinhanças.

Dessa forma, a radiação cósmica influi na intensidade da TL e LOE que, em geral, é constante perto da linha do Equador, mas a sua intensidade é aumentada nos pólos, devido ao campo geomagnético da Terra, pois as partículas que compõem os raios cósmicos são atraídas por esse campo.

Uma parte dessa radiação provoca a ionização por efeito fotoelétrico (efeito de Compton) e por produção de *pares*. Quando um cristal iônico é submetido à ação de radiações ionizantes, parte da energia é usada para produzir *defeitos* pontuais ou vários tipos de *centros*, que resultam em aprisionamento de elétrons e lacunas (cargas positivas) em defeitos localizados na Banda Proibida no interior de sua rede cristalina (Fig.

2), por estados metaestáveis criados por *defeitos* e impurezas.

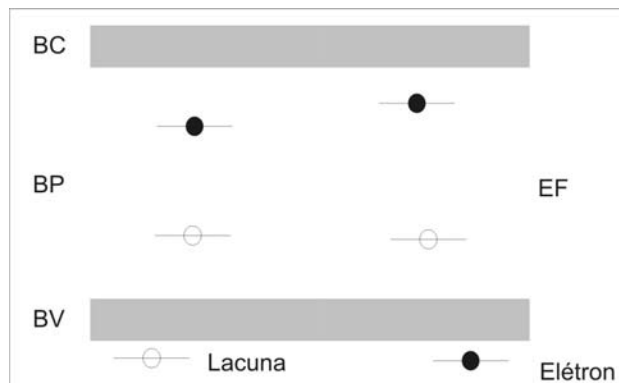


Figura 2. Modelo de bandas aplicado a um cristal iônico

Quando a amostra é aquecida ou estimulada opticamente, os elétrons aprisionados são liberados e podem se recombinar com buracos, e emitem luz TL ou LOE, respectivamente. O número desses centros, dentro de certos limites, cresce proporcionalmente à dose de radiação incidente e ao tempo de irradiação. Assim, medindo-se a luz emitida por esses centros é possível, por exemplo, determinar quando um mineral se cristalizou ou quando um sedimento foi exposto à luz solar pela última vez por um período mínimo de 6-8 horas (TL) e 2 horas (LOE) (Aitken 1985). Os métodos de datação por TL e LOE permitem obter idades desde poucas dezenas de anos até cerca de  $10^6$  anos, dependendo das características da amostra e da sensibilidade do equipamento de medida de TL e LOE.

A idade da amostra é calculada segundo a equação (1), onde: I = idade (anos); P = paleodose (Gy), energia absorvida pelo cristal pela incidência de radiação ionizantes;  $DA_\gamma$ ,  $DA_\beta$  e  $DA_{r.c.}$  = doses anuais (Gy/ano) relativas as radiações  $\beta$  e  $\gamma$  e aos raios cósmicos.

$$I = \frac{P}{DA_\gamma + DA_\beta + DA_{r.c.}} \quad (1)$$

Existem várias formas de se determinar o valor de P e o método mais conhecido é o da regeneração total. Nesse caso a amostra é submetida a um tratamento químico com ácido fluorídrico (HF), ácido clorídrico (HCl) e politungstato de sódio (SPT em inglês), para separar apenas os cristais de quartzo. A seguir a amostra é separada em aproximadamente seis partes, sendo uma submetida a leitura de TL/LOE, obtendo-se assim a chamada TL/LOE natural. As outras partes são submetidas a tratamento térmico a  $480^\circ\text{C}$ , por 15

min, para retirar toda a TL. No caso das medidas de LOE as amostras são expostas à luz solar durante aproximadamente 16 horas. A seguir, as amostras são irradiadas para receber doses conhecidas de radiações ionizantes e finalmente são medidas suas TL/LOE (Fig. 3A).

Com esses resultados é obtida uma curva de calibração para cada amostra, plotando as intensidades

TL em função da dose, fixando uma dada temperatura (Fig. 3B). Para o cálculo da idade então é obtido o valor de P, pela intersecção da curva de calibração com a linha que representa a TL natural, e das Das, por meio da determinação dos teores de  $U^{235}/U^{238}$ ,  $Th^{232}$ ,  $K^{40}$  por espectroscopia- $\gamma$  da própria amostra utilizando-se detectores de germânio ou de NaI(Tl).

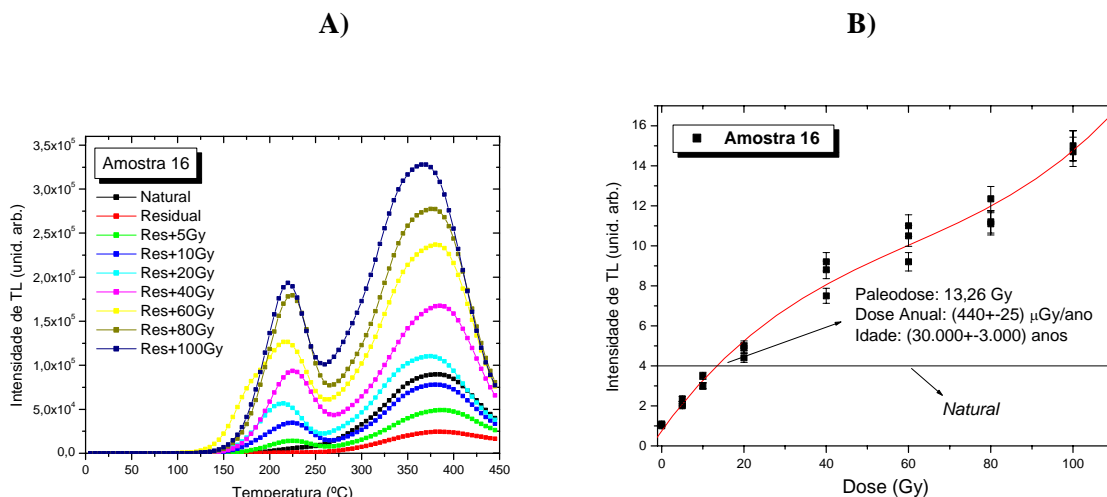


Figura 3. Exemplos dos dados obtidos para amostra de depósito coluvial da área de estudo. A) Curvas de emissão de TL dos grãos de quartzo em amostra natural e irradiada com doses diferentes; B) Curva de calibração de cristais de quartzo pelo método da regeneração total, cuja temperatura foi fixada em torno de 375°C

**RAIOS CÓSMICOS** Os raios cósmicos chamados de primários originam-se fora do Sistema Solar e são predominantemente compostos por prótons com uma mistura de núcleos com massa atômica grande. A energia média é de alguns GeV e a intensidade do espectro decai rapidamente à medida que a energia aumenta. O campo geomagnético é suficiente para influenciar as partículas de baixa energia e, dessa forma, a quantidade de raios cósmicos que atinge o topo da atmosfera é maior perto dos pólos. O fluxo de raios cósmicos depende do campo geomagnético e também da atmosfera.

Partículas com energias menores que 2,2 GeV não conseguem penetrar e atingir o nível do mar, devido à densidade da atmosfera. Isto significa que quando se move para os pólos, saindo do Equador, a radiação cósmica aumenta com a latitude até chegar a um valor constante nos pólos. Em relação à longitude tem-se uma variação pequena, em torno de 7%, pois o momento magnético não coincide com o eixo do *spin* da Terra. A intensidade relativa dos raios cósmicos (Fig. 4) aumenta aproximadamente de 6,5% até 40°, permanecendo praticamente constante para latitudes maiores (Prescott & Stephan 1982).

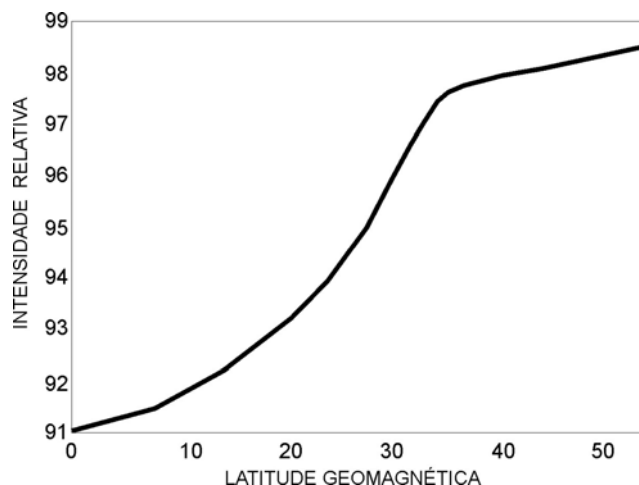


Figura 4. O efeito da latitude geomagnética, entre 0 a 55°, na intensidade relativa de raios cósmicos em função da latitude (Prescott & Stephan 1982)

Após penetrar na atmosfera os raios cósmicos começam a interagir com as moléculas do ar atmosférico, provocando uma cadeia de ionizações, produzindo prótons, muons ( $\mu$ ), nêutrons e outras partículas nucleares.

Os raios cósmicos que chegam à superfície da Terra são divididos em duas componentes: as radiações de baixa energia compostas na sua maioria por elétrons que são absorvidos após penetrarem 0,5 m no solo, e as radiações de alta energia que consistem predominantemente de muons.

**Valor teórico da radiação cósmica** A intensidade da radiação cósmica pode ser calculada teoricamente a partir da altura, latitude e tipo de rocha. O valor teórico da radiação cósmica obtido para ser utilizado

na datação dos depósitos cenozóicos da área em estudos foi de 209,85  $\mu\text{Gy/ano}$ .

A idade da amostra foi calculada segundo a equação abaixo (2), onde: K = a partir da densidade da rocha (mrads/ano); F, J e H são constantes que dependem do valor da latitude geomagnética do local de medida. Essas constantes podem ser determinadas por meio da Figura 5; h = altitude.

$$I = K \left[ F + J \exp\left(\frac{h}{H}\right) \right] \quad (2)$$

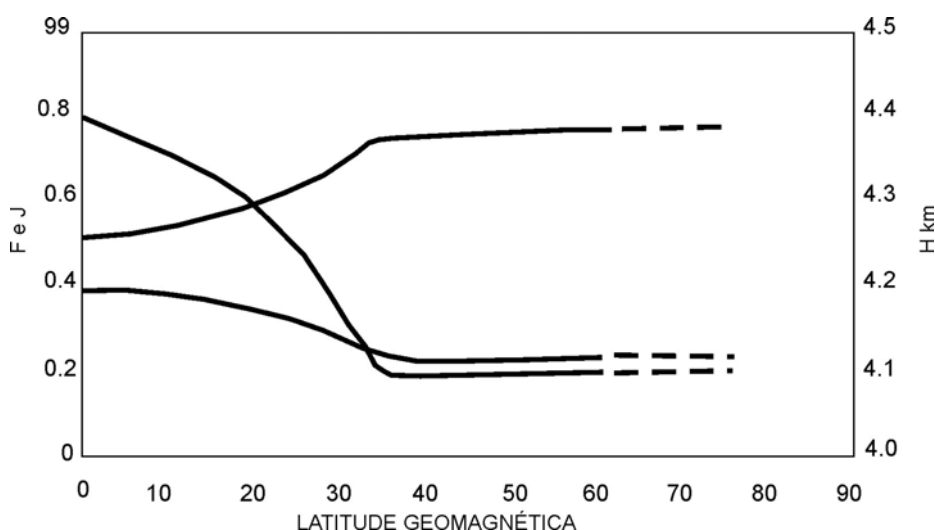


Figura 5. Fatores F, J e H em função da latitude geomagnética (Prescott & Stephan 1982)

**RESULTADOS** A dosimetria da radiação cósmica foi realizada durante trabalhos de campo, entre 15 e 16/02/2005 em Presidente Epitácio (SP) no reservatório da Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera), já que até o momento nenhuma medida desse tipo havia sido realizada no Brasil.

Para tanto, foi utilizado equipamento dotado de detector de NaI(Tl), acoplado à uma estação de trabalho portátil Canberra. Foram obtidos dados em três pontos distintos (Tabela 1), sendo três pontos em barco sobre o rio Paraná (Fig. 6) e um ponto para

controle, em terraço da margem esquerda do rio Paraná. Dessa forma, foi eliminada a possibilidade de contribuição de radiações provenientes do subsolo nas medidas, pela proteção da lâmina de água com 9 a 10 m de espessura do rio Paraná.

O valor experimental da radiação cósmica obtido para ser utilizado na datação dos depósitos cenozóicos da área em estudos foi em média de 174,22  $\mu\text{Gy/ano}$ . Para cada ponto de datação na área de estudos, será calculada a radiação cósmica a partir do valor obtido neste experimento.

Coordenadas	Área ( $\text{m}^2$ )	Horário da medida	Tempo de contagem	DA <sub>r.c.</sub> ( $\mu\text{Gy/ano}$ )	DA <sub>solo</sub> ( $\mu\text{Gy/ano}$ )
21°44,532' S 52°6,978' W	571,567	08:05	5.400,79	175,29	-
21°45,169' S 052°5,825' W	722,807	11:30	5.402,16	221,61	46,32
21°44,895' S 52°06,503 W	564,615	14:16	5.400,74	173,15	-

Tabela 1. Coordenadas dos locais de medida, áreas das medidas do espectro da radiação- $\gamma$ , tempos de medida e doses obtidas



*Figura 6. Medições de radiação cósmica realizadas em barco no rio Paraná*

**CONCLUSÕES** As medidas de radiação cósmica determinadas foram executadas em barco sobre o rio Paraná em Presidente Epitácio (SP), protegida da contribuição da radiação oriunda de isótopos radioativos do solo ( $U^{235}/U^{238}$ ,  $Th^{232}$ ,  $K^{40}$ ) por 9 a 10 m de lâmina de água. Dessa maneira, a média obtida foi de 174,22  $\mu Gy/ano$ , ao invés de 209,85  $\mu Gy/ano$  obtida pelo cálculo teórico. A diferença de cerca de 17% entre as médias experimental e teórica introduziria erros nas idades dos depósitos cenozóicos aqui estudados. Esse fato mostra a necessidade de novas medidas de radiação cósmica em outras regiões do Brasil para obter maior precisão nas idades TL e LOE. A causa dessa diferença está ligada ao fato que, variáveis como época do ano, clima, hora e dia, foram ignoradas no cálculo teórico, mas consideradas no cálculo experimental.

**Agradecimentos** O projeto foi desenvolvido com o apoio do Auxílio à Pesquisa da FAPESP (Processo 03/09681-9), bolsa de doutoramento da FAPESP à Alethéa E. M. Sallun (Processo 03/01737-5) e bolsas de produtividade em pesquisa do CNPq ao Kenitiro Suguio (Processo 304718/2003-3) e à Sonia Hatsue Tatumi (Processo 303974/2005-2).

### Referências

- AITKEN M. J. 1985. *Thermoluminescence dating*. London, Academic, 359 pp.
- PRESCOTT J.R. & STEPHAN L.G. 1982. The contribution of cosmic radiation to the environmental dose for thermoluminescent dating, latitude, altitude and depth dependences. *PACT*, **6**:17-25.
- OLIVEIRA V.I. 2003. *Relatório da influência da linha de transmissão de energia elétrica de alta tensão na intensidade da radiação cósmica*. Monografia de Graduação, FATEC-SP.