

ESTUDO DA TERMOLUMINESCÊNCIA NATURAL DO QUARTZITO, EM UMA ZONA MINERALIZADA EM OURO E URÂNIO (CANAVIEIRAS, JACOBINA, BAHIA)

JORGE FERREIRA* e DANIEL NORDEMANN**

ABSTRACT The quartzite of the Canavieiras gold mine (Jacobina, Bahia, Brazil) exhibits a high temperature peak (280 ± 2) °C in its natural thermoluminescence glow curve. It was experimentally determined that the amount of light in this peak could be reproduced to within 5% for grain sizes between 80 and 100 mesh (0.149 and 0.177 mm).

A positive correlation was found between the amount of this thermoluminescence and the uranium content with saturation beginning to be detected at the maximum (700 ppm) amounts of uranium found.

Assuming that the thermoluminescence peak used is at a temperature high enough to permit accumulation and stability at room temperatures, the thermoluminescence found could have accumulated in $(12.1 \pm 0.3) \times 10^6$ years. This may date a complete liberation of trapped electrons in conjunction with a well documented initiation of weathering.

INTRODUÇÃO A mina de ouro em Canavieiras está situada na Serra da Jacobina, 6 km ao sul da cidade do mesmo nome (Estado da Bahia). Essa serra faz parte da cadeia marginal da Cordilheira do Espinhaço, composta de rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano.

A ocorrência de urânio em Canavieiras foi descoberta por volta de 1953 (Bateman, 1958), sob forma de uraninita (U_3O_8). Mais tarde, porém, verificou-se a existência de uma correlação entre ouro, pirita e minerais radioativos, mostrando-se inclusive a existência de uma maior concentração de urânio no nível piritoso e em torno de 0,006% (White, 1957).

Acredita-se que a mineralização em Canavieiras seja de origem hidrotermal (White, 1964). Assim sendo, camadas de quartzito e conglomerados associados a ouro, urânio e pirita têm sido encontradas em vários lugares na Serra de Jacobina.

TERMOLUMINESCÊNCIA A termoluminescência (*TL*) é a emissão em forma de luz da energia armazenada por uma determinada substância quando aquecida. Esse fenômeno tem sido observado em sólidos não-condutores e tem sido sugerido como base de técnica de datação de rochas e minerais. Devido à presença de elementos radioativos naturais, os quais funcionam como fonte interna de radiação ionizante, supõe-se que os elétrons excitados por essa radiação sejam aprisionados em estados metastáveis. Na ocasião em que uma energia adicional (aquecimento) for cedida ao cristal, os elétrons se tornarão livres, podendo ser recapturados por armadilhas ou se recombinarem com uma lacuna, emitindo luz. Fenômeno idêntico é observado nos quartzitos da mina de Canavieiras, os quais possuem radioatividade natural, tendo acumulado elétrons com o tempo.

A emissão de luz foi registrada em aparelho leitor de *TL* convencional, sendo a função temperatura-tempo previamente estabelecida por uma fonte programada (Kepco Power Supply), fabricada pela Jarrel Ash. Como elemento aquecedor, foi utilizada uma

*Pesquisador do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia

**Perito da UNESCO (Projeto BRA-034/562 do POND-UNESCO), Professor Visitante da UFBA

lâmina de níquel da baixa capacidade térmica, e todas as medidas foram realizadas durante um minuto e vinte e três segundos, a uma razão constante de aquecimento de $4,3^{\circ}\text{C/s}$, a partir da temperatura ambiente.

Parte experimental As amostragens foram precedidas por estudos dos níveis da radiação gama total no interior da mina (gamametria). Foi utilizado um cintilômetro portátil tipo SPP3, com o detetor envolvido em folha de chumbo de 2 mm de espessura, e colocado diretamente sobre a rocha a ser medida (Ferreira, 1973), permitindo assim minimizar os efeitos das contribuições dos emissores gama externos ao ponto da rocha medido. Dessa forma, foram levantados perfis de atividade gama total ao longo das damas* 1 e 2, tomando-se por base os níveis "Piritoso" e "Liberino", nos quais a amostragem foi efetuada.

Foi realizado um estudo sistemático da variação na intensidade de luz emitida pela amostra de quartzito, após diferentes tempos de pulverização (90 a 180 s).

Os resultados experimentais (Fig. 1) mostram que as maiores variações na altura do pico TL para iguais massas de amostra (10 mg), ocorrem com os grãos triturados mais finos que 0,125 mm (115 mesh). Visando minimizar os efeitos da não-transparência do-

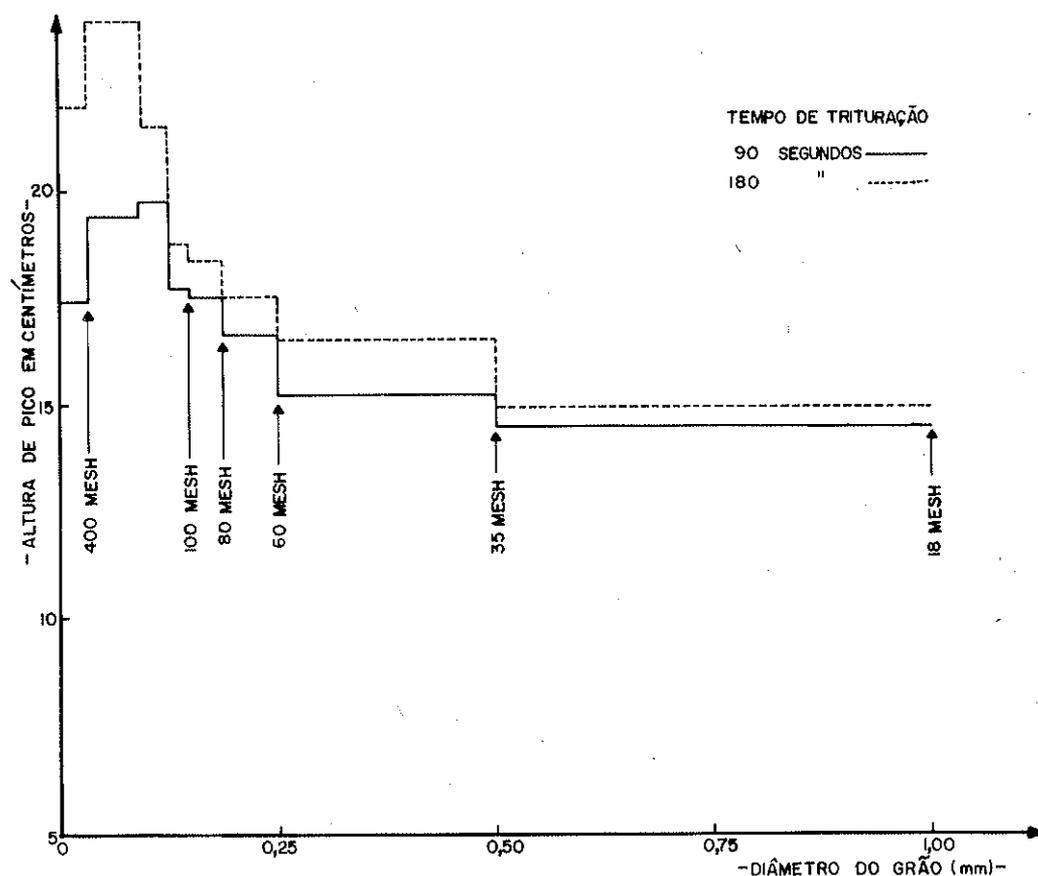


Figura 1 — Variação da resposta termoluminescente em função do diâmetro dos grãos, para iguais pesos de amostras (J15)

*Colunas de sustentação das galerias construídas durante as escavações da rocha

cristal à luz, assim como reflexões internas dos grãos da amostra, e evitar maiores influências de trituração, foram utilizados, neste trabalho, os cristais com dimensões entre 0,177 e 0,149 mm (80 a 100 *mesh*). Essa escolha se deve ao fato de que, nessa faixa, a altura do pico na curva de emissão não é sensivelmente afetada pelo tamanho do grão, nem pelo tempo de trituração. Graças a esse estudo, todas as curvas de emissão, representativas de diferentes pontos de uma mesma amostra, apresentam boa reprodutibilidade e dispersão inferior a 5% (desvio-padrão das medidas), garantindo a validade das medidas de TL (Fig. 2).

Os teores dos principais elementos radioativos presentes nas amostras em estudo foram determinados por espectrometria gama em laboratório. Na obtenção dos espectros, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

cadeia de contagem-gama de baixo ruído de fundo, composta de detetor NaI (Tl) (10 × 8 cm);

analisador de pulsos de 1024 canais (tipo 540 1B Hewlett Packard);

teleimpressora para registro numérico dos espectros;

fotomultiplicadora com janela de quartzo;

castelo de chumbo de 16 cm de espessura.

Todo o sistema foi calibrado para se obter uma repartição de 10 keV por canal, e os espectros obtidos permitiram determinar, sem tratamento químico, as concentrações

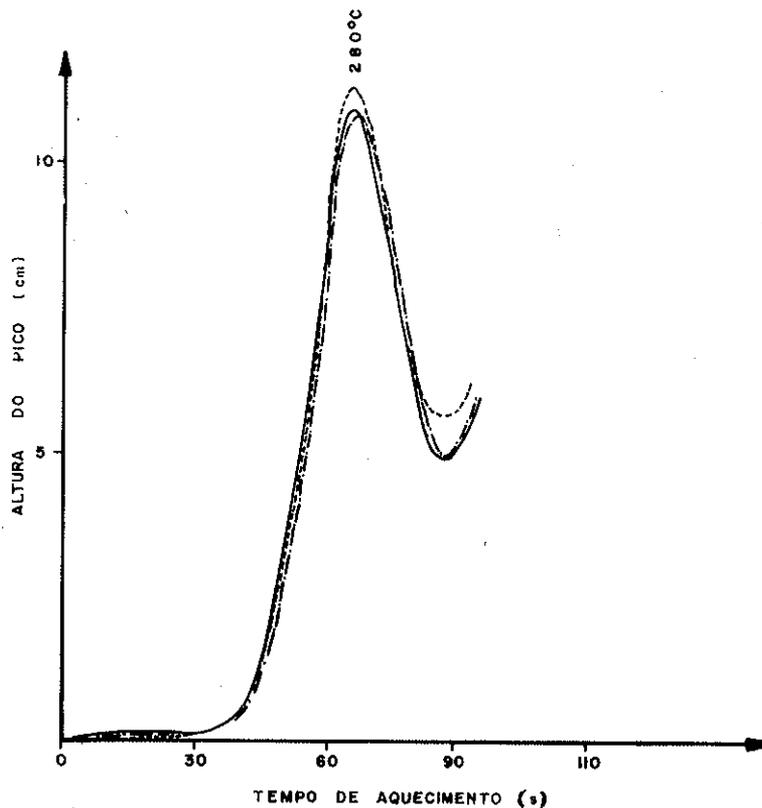


Figura 2 — Reprodutibilidade das curvas de emissão natural para iguais pesos de amostras de quartzo. A dimensão dos cristais usados na obtenção desta figura está compreendida entre 0,177 mm (80 *mesh*) e 0,149 mm (100 *mesh*). Amostra J7, perfil 1, dama 1

dos elementos radioativos urânio, tório e potássio. O método das tangentes foi utilizado nessas avaliações, além dos rendimentos de detecção determinados por Nordemann (1966).

IRRADIAÇÃO *IN SITU* DO MATERIAL ESTUDADO Visando estimar o percurso alcançado pelas principais radiações no quartzito e a energia liberada por uma massa (m) de amostra, foi realizada uma análise coerente das energias associadas às emissões, levando-se em conta as abundâncias e os esquemas de decaimento dos radionuclídeos. Admitiu-se cada família radioativa em equilíbrio secular. O cálculo da energia liberada foi determinado utilizando-se a expressão:

$$E_T(\text{U, Th, K}) = (Q_i \cdot C_i) \cdot m \text{ (erg} \cdot \text{ano}^{-1}\text{)}, \quad (1)$$

onde Q_i é a energia específica liberada, em $\text{erg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, de urânio, tório e potássio; C_i representa o teor do elemento (i) na amostra, em $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; e m é a massa de amostra usada nas medidas de TL (10 mg).

O percurso das partículas alfa foi estimado em relação ao ar e, posteriormente, calculado para o quartzito, através da expressão

$$P = (\rho/\rho_Q)C, \quad (2)$$

onde ρ representa a densidade do ar, ρ_Q a densidade do quartzito e C o percurso das partículas alfa no ar.

De maneira idêntica se procedeu para calcular o percurso das partículas beta em relação ao alumínio. O alcance máximo atingido pelas partículas alfa no quartzito é de $3,7 \cdot 10^{-3}$ cm (37 μm), correspondendo a uma energia de 7,680 MeV, e tendo como emissor principal o ${}_{84}\text{Po}^{214}$ (RaC). Para a radiação beta, o alcance máximo foi calculado como sendo igual a $2,8 \cdot 10^{-1}$ cm ($2,8 \cdot 10^3 \mu\text{m}$), correspondendo a uma energia máxima de 3,17 MeV, e tendo como emissor o Bi^{214} . A interação dos raios gama com a matéria é diferente, em virtude da diferença no poder de penetração, e das leis que regem sua absorção. Para o quartzito, o inverso do coeficiente de absorção corresponde a um comprimento de 10,4 cm, para a maior energia gama emitida pelo Tl^{208} (Th C''). Devido ao caráter exponencial dessa radiação não se pode definir um percurso correspondente a 100% da energia da radiação incidente sobre a matéria, mas sabe-se que 99% desta processa-se a uma distância, contada a partir da fonte emissora, de 4,6 vezes o inverso do coeficiente de absorção.

Nas Tabs. I e II pode-se observar que, para um meio homogêneo, a radiação alfa emitida pelo urânio é o principal contribuinte para a TL ; muito embora a radiação alfa do tório tenha um poder de penetração maior, sua energia dissipada sob forma de radiação ionizante é nitidamente inferior.

Assim, a TL de um pequeno volume de amostra nesse meio depende principalmente dos emissores locais da amostra em si, e não da radiação gama que vem de mais longe. De uma maneira geral, pode-se dizer que a totalidade das energias liberadas pela família do U^{238} , através das radiações alfa e beta, são dissipadas em esferas concêntricas tendo como raios os alcances máximos de $3,7 \cdot 10^{-3}$ e $2,8 \cdot 10^{-1}$ cm, respectivamente. E, também, os 99% da energia da radiação gama para a mesma família, são dissipados em uma esfera concêntrica com as duas primeiras, e de raio igual a 48 cm.

Em geral, para as medidas de TL natural e espectrometria gama, foram recolhidas, em cada ponto dos perfis, amostras de forma cúbica, com 7,3 cm de lado, a uma distância superior ao percurso da radiação beta de maior energia (3,17 MeV, Bi^{214}). Com esse resultado, pode-se dizer que a TL de um pequeno volume de amostra, em meio homogêneo, resulta das irradiações alfa e beta de curto alcance.

Tabela I – Energia total por elemento e percurso atingido pelas principais emissões radioativas no quartzito

Elementos radioativos	Radiações	Energia média dissipada por decaimento (MeV)	Fração da energia total (%)	Percurso da radiação de maior energia (cm)	Percurso em (μ m)
U ²³⁸	Alfa	42,8	91,1	$3,7 \cdot 10^{-3}$	37
	Beta	2,4	5,1	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$28 \cdot 10^2$
	Gama	1,8	3,8	9,2	$92 \cdot 10^3$
Total	–	47,0	100,0	–	–
Th ²³²	Alfa	35,7	92,2	$4,3 \cdot 10^{-3}$	43
	Beta	1,6	4,2	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$24 \cdot 10^2$
	Gama	1,4	3,6	10,4	$104 \cdot 10^3$
Total	–	38,7	100,0	–	–
K ⁴⁰	Beta	0,4	66,7	$0,8 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^2$
	Gama	0,2	33,3	7,5	$75 \cdot 10^3$
Total	–	0,6	100,0	–	–

Observação: no cálculo feito para a radiação gama foi considerado o comprimento correspondente a uma absorção de 99% da radiação ($x = 4,6\lambda$)

Tabela II – Contribuição dos principais elementos radioativos à termoluminescência para 10 mg de amostras

Elemento radioativo	Radiações			Total por elemento (MeV/s)	Fração das contribuições por elemento (%)
	Alfa (MeV/s)	Beta (MeV/s)	Gama (MeV/s)		
U ²³⁸	9,0	1,5	0,4	10,9	78,9
Th ²³²	2,2	0,3	0,1	2,6	18,9
K ⁴⁰	–	0,2	0,1	0,3	2,2
Total por radiação	11,2	2,0	0,6	13,8	100,0
Fração por radiação (%)	81,2	14,4	4,4	100,0	–

Os cálculos foram realizados com referência à amostra J9 perfil 1, dama 1. As concentrações de urânio, tório e potássio para esta amostra foram calculadas por espectrometria gama, com os seguintes resultados: U, 17 ppm; Th, 15 ppm; e K, 0,81%.

Observações:

1 g de U é equivalente a $1,23 \cdot 10^4$ dps de urânio 238

1 g de Th é equivalente a $4,1 \cdot 10^3$ dps de tório 232

1 g de K é equivalente a 31,45 dps, de potássio 40

CALIBRAÇÃO ÓPTICA DO APARELHO LEITOR DE TL Uma lâmpada incandescente, convenientemente alimentada, foi utilizada como fonte calibrada de luz, dada à falta absoluta de uma fonte-padrão. Sabendo-se ser 4π a potência emitida por essa lâmpada sob forma de luz, a potência de alimentação 0,528 W, o rendimento luminoso 7,9 lúmen/W e a equivalência energética do lúmen, para um comprimento de onda de 0,556 nm; (1 W = 621 lúmen), foi possível obter, no registrador que compõe o sistema

leitor da TL, desvios, em centímetros, comparáveis com aos obtidos quando das medidas da TL natural. Além disso, foi considerada também a relação entre os ângulos sólidos, subtendidos pelo fotocátodo a partir da posição onde se encontra a lâmpada (2,0 m), e a partir da lâmina de níquel onde a amostra é colocada para aquecimento posterior (3,0 cm do fotocátodo). Como resultado, a sensibilidade do aparelho de detecção da TL foi calculada em $11,1 \text{ cm}/\mu\text{W}$, ou seja, $9 \cdot 10^{-2} \mu\text{W}/\text{cm}$ de desvio do registrador. As curvas de emissão da TL natural foram descritas durante 50,4 s, podendo-se expressar suas áreas em unidades de energia. Para os cálculos, considerou-se a forma do pico semelhante à de um triângulo, resultando:

$$A = 22,7 \text{ ergs.} \quad (3)$$

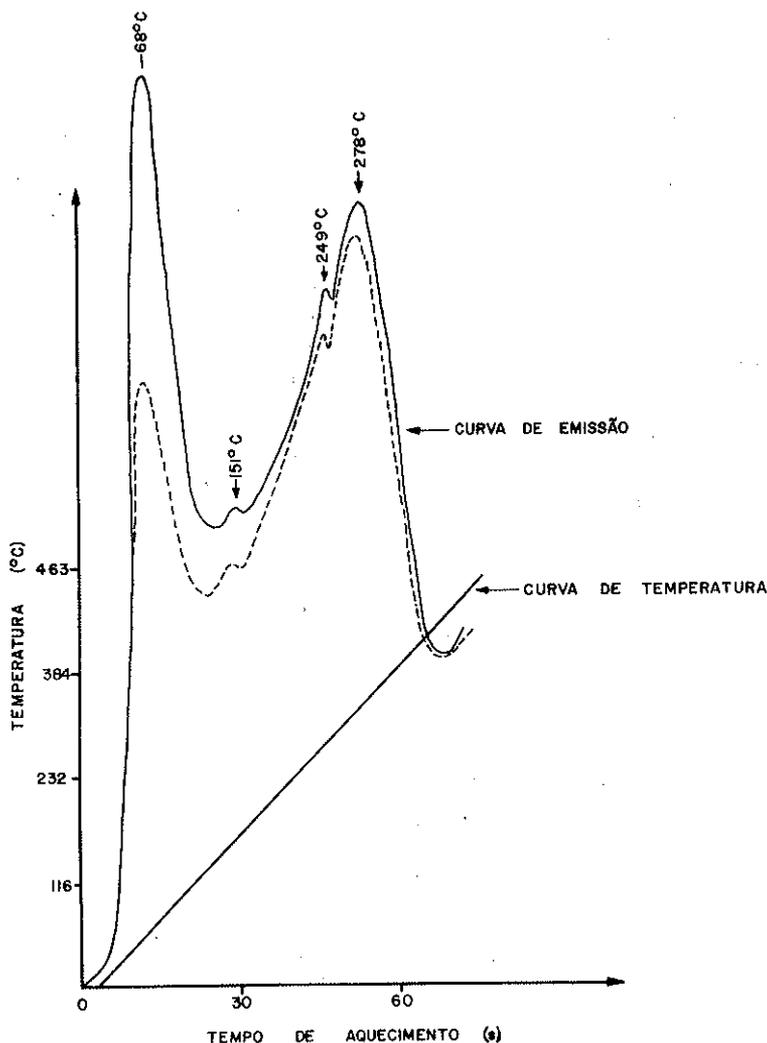


Figura 3 — Reprodutibilidade das curvas de emissão do quartzo, irradiado durante 30 min por fonte de raios X. As temperaturas dos máximos de emissão foram de 68 ± 2 , 151 ± 2 , 249 ± 1 e 278 ± 2 para uma mesma amostra (J9). Cada leitura foi feita 10 min após a irradiação

TERMOLUMINESCÊNCIA INDUZIDA POR MEIO DE RAIOS X; ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE ACUMULAÇÃO DA TL NO QUARTZITO Entende-se por "rendimento de acumulação" a relação da energia luminosa emitida por uma massa (m) de uma substância termoluminescente com a energia proveniente da radiação à qual foi exposta. Para avaliá-lo, foi necessário inicialmente submeter as amostras a um pré-tratamento térmico durante 20 min a 300 °C, a fim de drenar a TL natural existente. Um aparelho gerador de raios X (Rigaku Denki Co, Ltd.) com ânodo de cobre foi utilizado durante as irradiações, aplicando-se uma tensão de 35 kV, superior à tensão crítica de aceleração dos elétrons, para a excitação da radiação característica da série K ($V_K = 9$ kV), e uma corrente de 20 mA. Cada amostra (10 mg) foi colocada em recipiente plástico e, em seguida, irradiada a uma distância fixa de 12,0 cm da fonte. As medidas de TL artificiais foram feitas dez minutos após as irradiações, e as curvas de emissão exibiram quatro picos, cujas temperaturas de seus máximos foram, respectivamente, 68 ± 2 , 151 ± 2 , 249 ± 1 e 278 ± 2 °C (Fig. 3).

Com base nos resultados experimentais, foi utilizada a dose equivalente de $1,95 \cdot 10^7$ erg, necessária para reproduzir um pico de 1 cm de altura correspondendo à emissão de 22,7 erg. Em conseqüência, o rendimento de acumulação foi avaliado em $1,2 \cdot 10^{-5}$. Para comparar a TL natural com a TL artificial entre picos de mesma altura, estima-se a energia dissipada na amostra por unidade de tempo. Assim, devido às condições utilizadas nas irradiações, e à produção de raios (rendimento menor que 1%, Cullity, 1967), a potência do feixe incidente no anticátodo foi calculada em 7 W aproximadamente. Por outro lado, levando-se em conta sua absorção no ar e no material, de espessura L , a fração do feixe absorvida pela amostra foi avaliada como segue:

$$P = \frac{S}{2\pi R^2} KP_0 \cdot e^{-\mu_{ar}R} [1 - e^{-\mu(SiO_2)L}], \quad (4)$$

onde

$$\frac{S}{2\pi R^2}$$

representa o ângulo sólido subtendido pela amostra a partir do feixe de raios X emitido no anticátodo;

K , fração do feixe de raios X, transmitida através da janela de berilo do tubo gerador;

P_0 , potência do feixe emitido no anticátodo;

μ_{ar} , coeficiente médio de absorção do feixe de raios X no ar;

$e^{-\mu_{ar}R}$, fração residual do feixe, após percorrer a distância R no ar.

Os coeficientes de absorção do feixe de raios X no ar e na sílica foram considerados iguais a 9,8 e 80 cm²/g, respectivamente, para o comprimento de onda da radiação característica do cobre, CuK_α ($\lambda = 1,542$ Å). Em conseqüência, a energia dissipada na amostra foi estimada em $2,17 \cdot 10^4$ erg · s⁻¹, o que possibilitou a obtenção da curva de calibração de TL vérsus dose absorvida (Fig. 4).

A escala superior da abscissa, na Fig. 4, representa o tempo de exposição a que foram submetidas as amostras aos raios X, enquanto que a escala inferior representa a dose absorvida (ergs). Na escala vertical estão representados os valores médios da altura do pico de mais alta temperatura detetado após a irradiação 278 ± 2 °C.

Discussão e interpretação dos resultados As amostras de quartzito exibiram, em sua curva de emissão, um pico de TL natural, cuja temperatura foi avaliada em 280 ± 2 °C. Os resultados do estudo da TL natural e as medidas de espectrometria gama são vistos nas Tabs. III e IV.

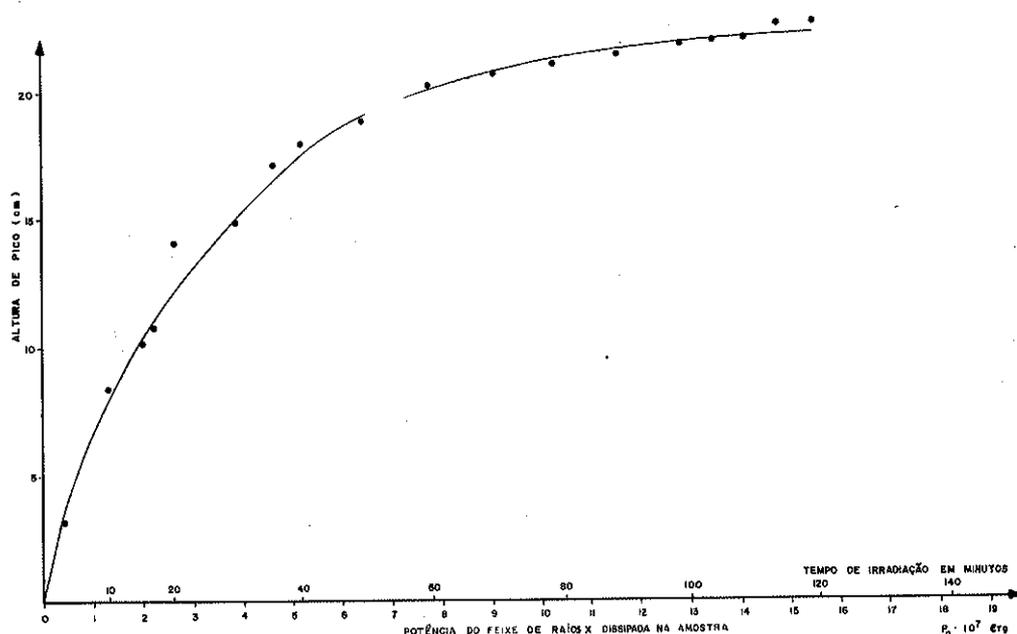


Figura 4 — Curva de calibração da TL induzida pelos raios X, em função da potência do feixe dissipado na amostra (J9), por tempo de exposição diferente. Para a excitação da radiação característica da série K no tubo de raios X, foi aplicada uma tensão superior ao valor crítico (V_K) de 35 kV e uma corrente eletrônica de 20 mA

Tabela III — Medidas de termoluminescência natural e avaliação de dose para as amostras do perfil 1, dama 1, levando-se em consideração as famílias do U^{238} , Th^{232} e K^{40} . Temperatura do pico de TL natural = $280 \pm 2^\circ C$

Amostras	Atividade (SPP3) <i>in loco</i>	Termoluminescência natural		Urânio (ppm)	Tório (ppm)	Potássio (%)	Dose de radiação natural** (erg/ano)
		H (cm)	Área (mm ²)				
J1	120	3,8	460	3,0 ± 0,5	4,0 ± 0,4	0,29 ± 0,03	1,28
J3	200	4,9	563	3,0 ± 0,6	14,0 ± 1,5	0,32 ± 0,03	2,12
J4	270	6,1	700	—	—	—	—
J5	350	6,6	680	5,0 ± 1,0	15,0 ± 1,5	0,34 ± 0,04	2,82
J6	550	8,5	950	7,0 ± 1,3	16,0 ± 1,7	0,36 ± 0,04	3,51
J7	450	10,5	1.170	19,0 ± 3,0	14,0 ± 1,5	0,48 ± 0,05	7,02
J8	350	8,5	950	—	—	—	—
J9	500	11,9	1.200	40,0 ± 5,4	18,0 ± 2,0	0,81 ± 0,08	13,80
J10	500	10,9	1.190	—	—	—	—
J11	650	12,4	1.250	65,7 ± 10,4	13,0 ± 1,4	*	21,13
J12	700	12,7	1.270	215,0 ± 34,4	47,0 ± 5,2	*	69,53
J13	760	13,1	1.310	663,0 ± 92,8	118,0 ± 13	*	212,17
J13B	900	12,4	1.240	167,0 ± 26,7	45,2 ± 5,0	*	54,74
J14	850	13,1	1.340	773,0 ± 108	125,0 ± 13,8	1,4 ± 0,15	237,48
J15	1.000	13,6	1.370	422,0 ± 59,0	68,0 ± 7,5	*	134,40
J17	750	11,5	1.200	—	—	—	—
J20B	550	10,7	1.190	—	—	—	—

*Abaixo do limiar de sensibilidade

$$U_{nat}^{238} = 0,73 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,73 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$Th^{232} = 0,20 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,20 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$K_{nat} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

**A dose de radiação natural, expressa em $\text{erg} \cdot \text{ano}^{-1}$, é relativa a uma amostra de 10 mg

Tabela IV – Medidas de termoluminescência natural e avaliação de dose para as amostras do perfil 2, dama 2, levando-se em consideração as famílias radioativas do U^{238} , Th^{232} e K^{40} . Temperatura do pico de TL natural = $280 \pm 2^\circ C$

Amostras	Atividade (SPP3) <i>in loco</i>	Termoluminescência natural		Urânio (ppm)	Tório (ppm)	Potássio (%)	Dose de radiação natural** (erg/ano)
		H (cm)	Área (mm ²)				
J1A	300	6,3	630	1,2 ± 0,2	4,0 ± 0,5	0,33 ± 0,03	0,73
J2A	400	8,0	720	4,0 ± 0,7	6,0 ± 0,7	0,32 ± 0,03	1,77
J3A	450	10,0	800	2,9 ± 0,6	18,0 ± 2,0	0,29 ± 0,03	2,42
J4A	500	12,0	1.000	6,0 ± 1,1	11,0 ± 1,2	0,62 ± 0,06	2,82
J5A	600	12,6	1.090	5,3 ± 1,0	15,0 ± 1,7	0,47 ± 0,05	2,92
J6A	650	14,0	1.111	9,8 ± 1,7	16,8 ± 1,8	0,27 ± 0,03	4,43
J7A	550	13,6	1.100	10,4 ± 1,7	17,1 ± 1,9	0,20 ± 0,02	4,63
J8A	560	15,0	1.150	13,0 ± 2,1	18,0 ± 2,0	0,32 ± 0,03	5,51
J9A	750	18,4	1.220	38,0 ± 6,1	13,0 ± 1,4	•	12,68
J10A	1.100	20,5	2.030	136,0 ± 22	34,0 ± 3,7	•	44,34
J11A	800	19,0	1.800	–	–	–	–
J12A	800	19,3	1.810	–	–	–	–
J13A	800	19,3	1.800	–	–	–	–
J14A	850	19,6	1.880	–	–	–	–
J15A	900	20,1	2.000	–	–	–	–

*Abaixo do limiar de sensibilidade

$$U_{nat}^{238} = 0,73 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,73 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$Th^{232} = 0,20 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,20 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$K_{nat} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

**A dose de radiação natural, expressa em $\text{erg} \cdot \text{ano}^{-1}$, é relativa a uma amostra de 10 mg

Estudando as correlações existentes entre a TL natural e as variações nas concentrações de urânio (ppm) em função da distância ao nível mineralizado, duas conclusões podem ser tiradas. A TL natural vérsus a distância ao nível mineralizado, parece uma função quase que linear, enquanto que as concentrações de urânio decrescem muito rapidamente. Pode-se observar ainda que a diminuição da TL em relação às concentrações de urânio é bem mais lenta, mostrando a não-existência de uma correlação direta (Fig. 5).

Tais comportamentos anômalos podem ser melhor entendidos levando-se em conta os seguintes aspectos. Para um meio não-homogêneo, como o do caso em questão, o urânio desempenha um papel importante na irradiação interna das amostras; parte desta é originada pelo emissores gama localizados fora da mesma. Nessas condições, a maior parte da amostra é irradiada pelos emissores de curto alcance, assim como pela radiação gama externa, que é emitida por uma fonte bastante intensa. Para pontos afastados do nível mineralizado, observa-se um decréscimo da TL , correspondente a várias energias emitidas pelos descendentes do urânio. Por outro lado, a correlação entre a TL natural e a atividade gama total parece aceitável para contagens gama inferiores a 600 Hz, mostrando, no entanto, uma tendência à saturação para valores superiores a esse. Isso explica satisfatoriamente o decréscimo da intensidade da TL em função da distância ao filão mineralizado.

TERMOLUMINESCÊNCIA NATURAL EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE DE DOSE ABSORVIDA Com base nas determinações dos principais elementos radioativos (urânio, tório e potássio), por espectrometria gama em laboratório, calculou-se a intensidade de dose absorvida, em $\text{erg} \cdot \text{ano}^{-1}$, correspondente a 10 mg de amostra. Os efeitos devido à radiação cósmica não foram levados em conta, uma vez que a rocha em

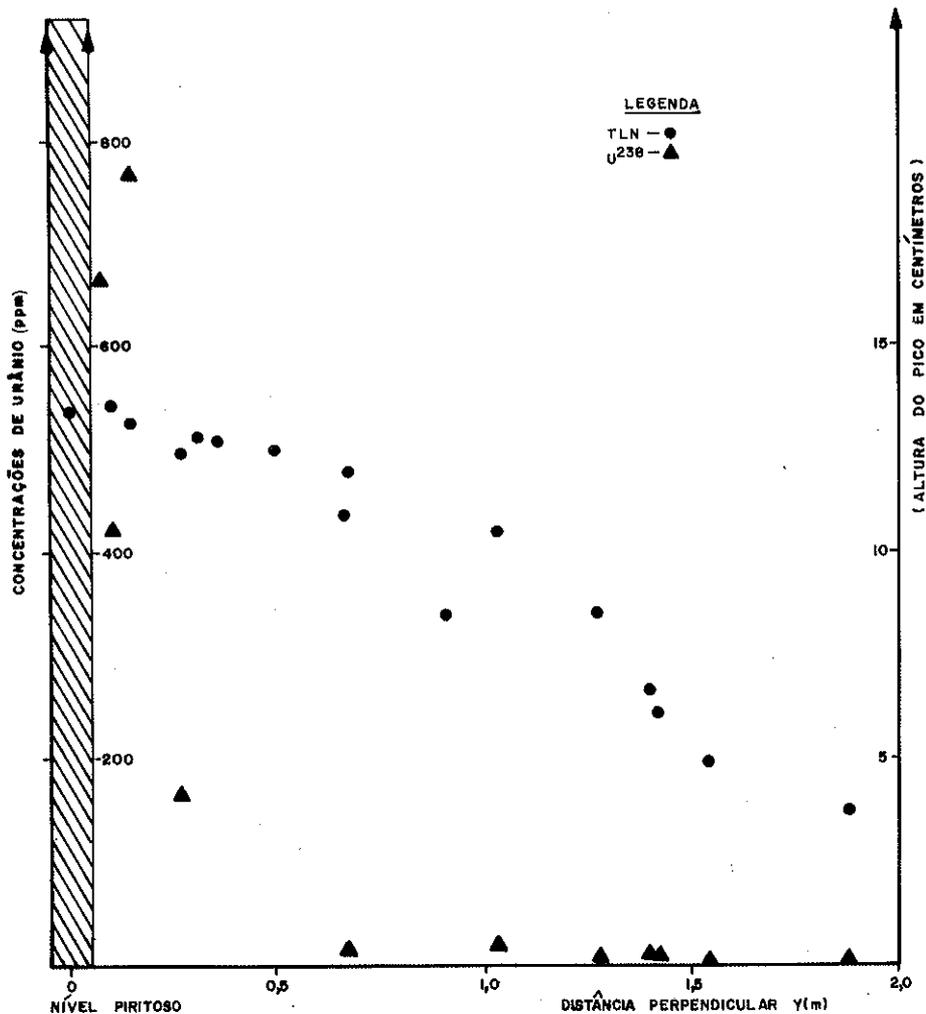


Figura 5 — Variações da termoluminescência natural e das concentrações de urânio (ppm) em função da distância ao nível piritoso

estudo continha mais de 1 ppm de urânio e tório. Da mesma forma, os efeitos produzidos pela radiação gama externa à mesma não foram consideradas, pois, esta só interfere de modo apreciável até 0,50 m do filão mineralizado (Fig. 5). O estudo da *TL* natural em função da intensidade de dose absorvida mostrou um crescimento quase que linear da *TL* para pequenas doses e, acima de certo valor, uma região de saturação (Fig. 6).

Sabe-se que, quando uma substância exhibe o fenômeno da *TL*, restrições específicas à temperatura são mantidas durante a excitação dos elétrons. No caso em questão, considerando-se os aspectos geológicos que determinaram a formação dos quartzitos, bem como a deposição da camada mineralizada, certamente tais fenômenos influenciaram a acumulação da *TL*. Também o gradiente de calor provocado quando da deposição da camada mineralizada drenou a *TL* preexistente, supondo-se, entretanto, que a radiação natural preencheu posteriormente os defeitos já existentes e criou outros adicionais.

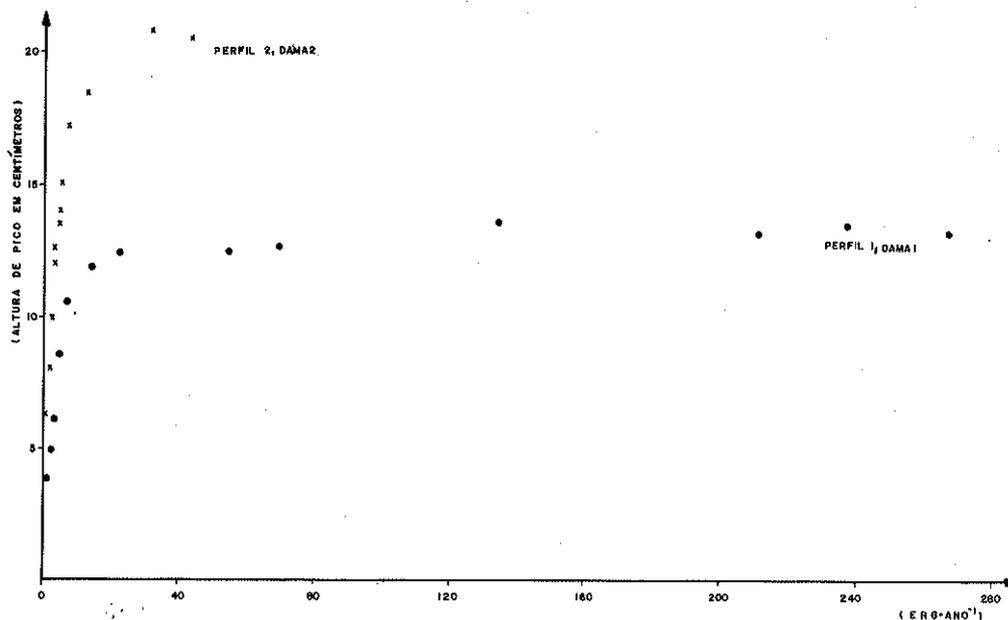


Figura 6 — Termoluminescência natural em função da intensidade de dose de radiação absorvida, para iguais pesos de amostras (10 mg)

ESTIMATIVA E INTERPRETAÇÃO DO TEMPO DE ACUMULAÇÃO DA TERMOLUMINESCÊNCIA NATURAL NO QUARTZITO O fenômeno da *TL* é uma função que depende da acumulação da energia nos cristais, e do tempo. Existem casos em que o tempo de acumulação da *TL* a que foram submetidas as amostras não representa idade geológica das mesmas, a exemplo do que acontece com rochas metamórficas (Johnson, 1963). Para o caso em questão, o tempo que se pode tentar estimar refere-se a estágios subsaturados da *TL* à temperatura constante, ou pelo menos consideravelmente inferior à do pico de *TL* natural detetado, $280 \pm 2^\circ\text{C}$.

A curva de intensidade da *TL* versus dose absorvida foi utilizada na tentativa de datar o evento geológico que deu origem à acumulação da *TL* no quartzito, utilizando-se apenas sua região linear. Por outro lado, sendo os quartzitos pouco fraturados e não alterados, pode-se considerá-los como um sistema fechado conveniente para datação. Tal consideração permite que se admita que o urânio se encontre possivelmente em equilíbrio radioativo com seus descendentes, pois não houve migrações de rádio ou radônio em porcentagens apreciáveis (Aitken, 1968). Dessa forma, tomando-se a região linear da Fig. 6, pode-se definir que a *TL* natural é função da intensidade de dose absorvida (*I*), relativa a uma amostra de 10 mg e expressa em $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, do rendimento de acumulação da *TL* (*R*), e do tempo. Quanto à *TL* artificial, depende da dose equivalente, além do rendimento de acumulação, tal que:

$$t = \frac{D \text{ (dose artificial)}}{I \text{ (natural)}} \text{ (anos).}$$

As Tabs. V e VI mostram os resultados obtidos a partir dessa expressão, nas quais se observa que as amostras exibem idades diferentes, mas de um modo geral, da mesma ordem de grandeza.

Tabela V - Avaliações da intensidade de doses absorvidas natural e artificial - perfil 1, dama 1, considerando-se as famílias radioativas do U^{238} , Th^{232} e K^{40} . Temperatura do pico de TL natural = $280 \pm 2^\circ C$.

Amostras	Intensidade de dose absorvida natural ($erg \cdot ano^{-1}$) **	Dose de radiação artificial (erg)	Idade = $\frac{\text{dose artificial}}{\text{dose natural}}$ (ano)
J1	1,28	$4,16 \cdot 10^6$	$3,25 \cdot 10^6$
J3	2,12	$6,25 \cdot 10^6$	$2,94 \cdot 10^6$
J5	2,82	$9,37 \cdot 10^6$	$3,82 \cdot 10^6$
J6	3,51	$14,58 \cdot 10^6$	$4,15 \cdot 10^6$
J7	7,02	$20,31 \cdot 10^6$	$2,89 \cdot 10^6$
J9	13,80	$25,52 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^6$
J11	21,13	$28,08 \cdot 10^6$	
J12	69,53	$28,12 \cdot 10^6$	Região
J13	212,17	$29,68 \cdot 10^6$	
J13B	54,74	$28,08 \cdot 10^6$	de
J14	237,48	$29,80 \cdot 10^6$	saturação
J15	134,40	$31,76 \cdot 10^6$	
J16	278,25	-	

$$U^{238} = 0,73 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,73 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$Th^{232} = 0,20 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,20 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$K^{40} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 2,7 \cdot 4,18 \cdot 10^2 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

**A intensidade de dose absorvida natural, expressa em $erg \cdot ano^{-1}$, é relativa a uma amostra de 10 mg

CONCLUSÕES A interpretação dos perfis através da TL natural mostrou um decréscimo quase que linear em função da distância ao nível mineralizado, embora para pontos próximos a este, onde a concentração dos elementos radioativos revelou-se bastante elevada, a TL exibida pelo quartzito apresentou o fenômeno de saturação. Semelhantemente, observou-se que a atividade gama total medida no interior da mina decresceu em relação aos pontos afastados do nível piritoso e, além disso, uma correlação positiva entre a TL natural e os teores de urânio foi verificada. Trabalhos efetuados por White (1957), em Canavieiras, mostraram existir uma correlação direta entre minerais radioativos e ouro, enquanto que aqui foi possível mostrar que pontos dos perfis de baixa concentração exibem resposta termoluminescente também de baixa intensidade. Para que uma determinada substância apresente o fenômeno da TL, torna-se necessário que restrições específicas à temperatura tenham sido mantidas durante a excitação dos elétrons. É possível que diferentes pontos da rocha ora estudada tenham sido submetidos a diferentes aquecimentos, de modo tal que o maior dos valores calculados representa uma idade mínima que pode caracterizar um evento geológico relativamente recente. Fenômeno idêntico pode também ocorrer quando se procura estabelecer idades de rochas através do método K-Ar. Nessas condições, o valor de $12,1 \pm 0,3$ m.a. será aqui utilizado como indicativo de uma idade mínima que poderá ser interpretada de duas maneiras:

- 1) representar um evento geológico de idade miocênica;
- 2) representar uma idade mínima sem qualquer conotação com a história térmica da rocha.

Através dos dados da geologia regional e de outros dados geocronológicos, não temos conhecimento de eventos ocorridos no Mioceno, de modo que teremos de admitir a idade de $12,1 \pm 0,3$ m.a. como resultante da liberação quase total dos elétrons armadilhados e, provavelmente, ligada a um intemperismo acentuado.

Tabela VI — Avaliações da intensidade de doses absorvidas natural e artificial perfil 2, dama 2, considerando-se as famílias radioativas do U^{238} , Th^{232} e K^{40} . Temperatura do pico de TL natural = 280 ± 2 °C

Amostras	Intensidade de dose absorvida natural (erg · ano ⁻¹)**	Dose de radiação artificial (erg)	Idade = $\frac{\text{dose artificial}}{\text{dose natural}}$ (ano)
J1A	0,73	$8,85 \cdot 10^6$	$12,12 \cdot 10^6$
J2A	1,77	$13,02 \cdot 10^6$	$7,35 \cdot 10^6$
J3A	2,42	$18,74 \cdot 10^6$	$7,74 \cdot 10^6$
J4A	2,82	$25,52 \cdot 10^6$	$9,04 \cdot 10^6$
J5A	2,92	$28,12 \cdot 10^6$	$9,63 \cdot 10^6$
J6A	4,43	$33,85 \cdot 10^6$	$7,64 \cdot 10^6$
J7A	4,63	$31,76 \cdot 10^6$	$6,85 \cdot 10^6$
J8A	5,51	$38,54 \cdot 10^6$	$6,99 \cdot 10^6$
J9A	12,68	$54,12 \cdot 10^6$	$4,26 \cdot 10^6$
J10A	44,34	$83,34 \cdot 10^6$	$1,87 \cdot 10^6$
J11A	—	—	—
J12A	—	—	Região
J13A	—	—	de
J14A	—	—	de
J15A	—	—	de saturação

$$U_{nat}^{238} = 0,73 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,73 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$Th^{232} = 0,20 \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 0,20 \cdot 4,18 \cdot 10^7 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$K_{nat} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} = 2,7 \cdot 4,18 \cdot 10^2 \text{ erg} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

**A intensidade de dose absorvida natural, expressa em $\text{erg} \cdot \text{ano}^{-1}$, é relativa a uma amostra de 10 mg

BIBLIOGRAFIA

- AITKEN, M. J. — 1968 — Thermoluminescent dating in Archeology. Thermoluminescence of Geological Materials Academic Press, London and New York, pp. 369-377
- BATEMAN, J. D. — 1958 — Uranium bearing auriferous reefs at Jacobina Brazil. Econ. Geol. **53**: 417-425
- CULLITY, B. D. — 1967 — Elements of X-ray diffraction. Addison Wesley Publishing Company Inc., London
- FERREIRA, J. — 1973 — Estudo da termoluminescência do Quartzito em uma zona mineralizada em ouro e urânio (Canavieiras, Jacobina, Bahia). de Mestrado, Universidade Federal da Bahia (inédito)

- JOHNSON, N. M. — 1963 — Thermoluminescence in contact metamorphosed limestone, *J. Geol.* 71: 596-616
- NORDEMANN, D. — 1966 — Emissions gamma de quelques météorites et roches terrestres. Evaluation de la radioactivité du sol lunaire. Thèse, Paris (inédito)
- WHITE, M. G. — 1957 — Uranium in the Serra Jacobina, State of Bahia, Brazil, United Internat. Conf. Peaceful. Usis of Atomic Energy Geneva, 1955. Proc. 6, 140 pp.
- WHITE, M. G. — 1964 — Urânio em Morro do Vento, Serra de Jacobina, Bahia. Geological Survey Bulletin, 185-A