

**DESEQUILÍBRIOS ISOTÓPICOS NA CADEIA 4n NO SISTEMA DO MORRO DO FERRO, POÇOS DE CALDAS (MG)**

Daniel Marcos Bonotto\*  
 Kenkichi Fujimori\*\*  
 \* IG/UNESP/SP  
 \*\* IAG/USP/SP

**ABSTRACT**

Thorium isotopic analyses were performed on well spoils of the main ore body at Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG), on groundwaters from several boreholes in the area and surface waters from a stream that originates at the base of the hill.

For extraction of thorium a long chemical process was applied to samples; activities of Th-228 and Th-232 isotopes (4n series) were determined by alpha spectrometry method.

The ratios Th-228/Th-232 determined for well spoils did not show marked disequilibria between these isotopes. In ground and surface waters, the ratios Th-228/Th-232 showed marked isotopic fractionation between these nuclides, not related to selective leaching of Th-228 in relation to Th-232 or recoil of Th-228 nucleus.

**INTRODUÇÃO**

A maioria dos minerais hospedeiros de tório são altamente refratários ao intemperismo e por isso esse elemento foi considerado por muito tempo como imóvel e bastante insolúvel nas águas naturais (Langmuir & Herman, 1980).

Nos últimos 20 anos foram publicados dados acerca da concentração de tório nas águas naturais, mas muitos deles devem ser assumidos como máximos valores possíveis em virtude das amostras não terem sido filtradas logo no início do procedimento químico de extração. As melhores análises fazem referência a duas frações para as quais se determinaram as concentrações de tório: solúvel e em suspensão.

Nas águas superficiais e profundas de vários oceanos foram obtidas concentrações de tório dissolvido entre  $4,1 \times 10^{-3}$  e  $4,5 \times 10^{-3}$  ppb (Moore & Sackett, 1964; Somayajulu & Goldberg, 1966; Kaufman, 1969; Moore, 1981; Nozaki et al., 1981; Li et al., 1981; Bacon & Anderson, 1982) nas águas de lagos de diferentes localidades foram determinadas concentrações entre  $3 \times 10^{-4}$  e 6,4 ppb (Kamath et al., 1964; Wang et al., 1983; Wahlgren & Orlandini, 1982; Simpson et al., 1982); nas águas de córregos e rios os teores variam entre  $3 \times 10^{-3}$  e 0,41 ppb (Miyake et al., 1964; Thurber, 1965; Linsalata, 1980; Lei, 1984) e nas águas de fontes e poços de diferentes profundidades e litologias variaram entre 0,1 e 2 ppb (Osmond, 1964; Kamath et al., 1964; Thurber, 1965; Lei, 1984).

O isótopo Th-232 é precursor da série do tório (4n) e gera o Ra-228 por emissão alfa de 4,01 MeV de energia (Lederer et al., 1967). O Ra-228

é o "filho" de vida mais longa da cadeia (meia-vida = 6,7 anos), atinge o equilíbrio radioativo com o Th-232 praticamente após 40 anos e gera o Th-228 por emissão beta. O Th-228 possui meia-vida de 1,9 anos e recupera o equilíbrio radioativo com o Ra-228 após cerca de 5 anos. Na cadeia natural do tório, após 7 transformações do tipo alfa e 5 do tipo beta, é atingido o isótopo final estável Pb-208 (Fig. 1).

As razões isotópicas Th-228/Th-232 caracterizadas em diferentes sistemas naturais apresentaram-se variáveis, tendo sido determinados valores entre 2,5 e 150 nas águas oceânicas (Knauss et al., 1978; Moore, 1981; Kaufman et al., 1981), entre 1,1 e 4,2 nas águas de córregos e rios (Titayeva & Veksler, 1977; Lei, 1984), entre 5,7 e 260,0 nas águas subterrâneas (Lei, 1984) e entre 0,7 e 30,0 em amostras de carapaças de moluscos, barita, material piroclástico, sedimentos, granitos (Moore & Sackett, 1964; Somayajulu & Goldberg, 1966; Titayeva & Veksler, 1977; Bennett et al., 1982; Joshi et al., 1983; Carpenter et al., 1984).

O presente trabalho pretendeu avaliar a extensão do desequilíbrio radioativo entre o Th-228 e o Th-232 em sistema aquífero situado no manto de alteração constituído de material inconsistente composto de argila, silte e areia, derivado de intensa intemperismo in situ. Do ponto de vista dos isótopos investigados, em diferentes condições pluviométricas, foram verificadas as consequências da interação entre as fases líquida e sólida, representadas pela água de infiltração e estratos do aquífero.

#### ÁREA ESTUDADA

No desenvolvimento dessa pesquisa selecionou-se como área de estudo o Morro do Ferro, localizado há cerca de 15 km ao sul da cidade de Poços de Caldas, estância hidromineral situada no Estado de Minas Gerais a 21° 47' latitude sul e 46° 34' longitude oeste. O Morro do Ferro situa-se próximo ao centro do Planalto de Poços de Caldas e dentro do contexto geológico regional faz parte de massa de tinguaito localizada na borda de uma área em que a rocha sofreu intensa alteração hidrotermal (Almeida, 1977).

Uma acentuada anomalia radiométrica na área do Morro do Ferro foi identificada em 1953 no levantamento aeroradiométrico promovido pelo DNPM, devendo-se primariamente ao tório e secundariamente ao urânio e terras raras (Tolbert, 1955). A jazida do Morro do Ferro e a maioria das mineralizações do maciço parecem estar condicionadas à estrutura circular da região centro-leste do planalto, com 12 km de diâmetro, e às duas menores existentes em seu interior (Paradella & Almeida Filho, 1976).

Identificaram-se vários minerais toríferos como responsáveis pelo alto nível de radioatividade observado. Wedow (1967) caracterizou a bastnesita, torogumita e cerianita como minerais secundários, considerando-os como produtos da laterização de allanita. Presborn (1980) caracterizou a presença de cheralita, fersunita e zircão torífero. Fujimori (1982, 1983) encontrou silicato de terras raras, monazita, zircão contendo terras raras, torita, torianita, microlita e sugeriu a torbastnesita como principal mineral torífero secundário.

O referido local é favorável à presença dos isótopos investigados, tendo despertado interesse em vários pesquisadores quando Eisenbud et al. (1979) propuseram a sua utilização no estudo da maneira pela qual o plutônio se mobilizaria de um depósito geológico que fosse fraturado, em virtude das similaridades químicas do tório e plutônio. Desde então, um amplo projeto envolvendo inúmeras instituições passou a ser desenvolvido e os resultados da mobilização do tório a partir da erosão superficial por precipitações, da solubilização por água meteórica e da solubi-

lização por água subterrânea são discutidos por Lei (1984).

Os índices pluviométricos medidos em posto meteorológico localizado há cerca de 6 km do Morro do Ferro representam as precipitações na área estudada. Na Fig. 2 está ilustrada a média mensal determinada entre 1976 e 1985. A pluviometria máxima ocorre nos meses de dezembro e janeiro, cada um acumulando cerca de 300 mm de chuva, e, durante a estiagem, a pluviometria atinge valores de até 30 mm num mês.

O Morro do Ferro contribui para a formação de uma pequena bacia de drenagem superficial restrita a uma distância de vários quilômetros, onde estão presentes depressões, reços e áreas pantanosas. A Fig. 3 é uma fotografia aérea da região, onde se nota que a face sul do Morro do Ferro forma o contorno setentrional da bacia e possui a principal zona do corpo mineralizado de tório. A porção meridional da bacia é limitada por morros que foram designados de Colina Oposta por Lei (1984). A hidrologia superficial da bacia é simples, consistindo do Córrego Norte e Córrego Sul. O Córrego Norte é de importância secundária e o Córrego Sul se origina na base do Morro do Ferro, contorna sua periferia em traçado encurvado e flui numa direção oriental para a única saída da bacia. Para uma medida precisa do fluxo no Córrego Sul foi construído um Vertedouro de concreto na posição indicada na Fig. 3.

Em 1981 executou-se campanha de sondagens rotativas para a realização de nove furos (números 1 a 9 na Fig. 3) e instalação de medidores de nível d'água, visando a caracterização do comportamento do lençol freático da área a fim de subsidiar a pesquisa sobre a migração do tório como análogo natural do plutônio (IPT, 1982). Todos os furos são rasos, o mais profundo tendo atingido 65 metros. Sete deles atingiram o lençol freático, situando-se um na zona mineralizada (5), quatro nas proximidades desta zona (2, 4, 6 e 9) e dois distanciados desta zona (1 e 3).

#### MATERIAIS E MÉTODOS

Durante os meses de dezembro de 1982, março de 1983 e setembro de 1983 coletaram-se amostras de águas subterrâneas das sondagens que atingiram o lençol freático e amostras de águas superficiais do Vertedouro. Para as análises isotópicas de tório foi coletado um volume de cerca de 20 litros de água, recolhido manualmente dos furos de sondagem por intermédio de cilindro oce de ferro com 1 m de comprimento e 3" de diâmetro, vedado em uma das extremidades.

Os materiais sólidos selecionados para análise consistiram de amostras preparadas a partir de testemunhos do furo de sondagem 5, executado na área mineralizada do Morro do Ferro e que interceptou veios de magnetita intensamente fragmentados que fazem parte do "stockwork" cujo dique principal se localiza paralelamente à reta que une esse furo, 7 e 8. Partindo-se de testemunhos relativos a diferentes intervalos de profundidade, após trituração, mistura e homogeneização, prepararam-se amostras "médias" representativas de trechos da sondagem, analisando-se 13 amostras associadas ao intervalo de 0 a 27,30 metros de profundidade. Para a determinação dos isótopos de tório nas águas e testemunhos analisados, necessitou-se efetuar processamento químico das amostras, envolvendo várias etapas desde a separação dos elementos interferentes até a preparação de fontes radioativas contendo o material extraído. As etapas envolvidas consistiram em: precipitação com hidróxido férrico; extração de ferro com solvente orgânico; separação do urânio em resina de troca aniônica acidificada com HCl 6N; reprecipitação dos hidróxidos; extração de alumínio com NaOH 3N; diluição em HCl 4N; passagem em resina de troca catiônica para extração do alumínio residual; eluição da fração torífera com ácido oxálico 0,75N; decomposição do ácido oxálico

com solução de  $\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3$  1:1; dissolução do resíduo seco com  $\text{HNO}_3$  0,1N; extração de tório com TTA diluído em benzeno e deposição em disco de aço inoxidável.

Para a obtenção das atividades de interesse na pesquisa, submetaram-se os discos preparados à técnica de espectrometria alfa com detetor semicondutor de barreira de superfície de Si (Au) da ORTEC, Mod. RA-026 -450-300, com  $450 \text{ mm}^2$  de área ativa e 0,3 mm de profundidade de depleção. Os espectros de interesse foram registrados em analisador multicanal Norland IT-5300, com 1024 canais, tendo sido efetuada uma calibração prévia do sistema espectrométrico utilizado. A Figura 4 ilustra o diagrama de bloco do sistema empregado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção das razões Th-228/Th-232 nas amostras analisadas, empregaram-se as contagens dos picos do Th-228 e Th-232 presentes no espectrograma alfa encontrado.

Na Fig. 5 está ilustrado o espectrograma alfa do tório extraído da amostra de testemunho do furo de sondagem 5, proveniente de 9,38 metros de profundidade e na tabela 1 estão representados os resultados das razões isotópicas Th-228/Th-232 determinadas para todas as amostras de testemunhos analisadas. De acordo com a distribuição dos resultados em função da profundidade e suas incertezas analíticas, nota-se a existência de equilíbrio radioativo entre o Th-232 e o Th-228 ao longo de praticamente todo o trecho de sondagem analisado. O valor médio encontrado para a razão Th-228/Th-232 nas amostras analisadas foi de  $1,09 \pm 0,10$ , apresentando-se apenas duas amostras com excesso de Th-228 em relação a Th-232.

Na Fig. 6 está ilustrado o espectrograma alfa do tório extraído da amostra de água subterrânea do furo de sondagem 1, coletada em 27/9/83, e, na tabela 2, estão representados os resultados das razões Th-228/Th-232 determinadas para as demais amostras analisadas. Conforme se observa, as águas subterrâneas e superficiais analisadas apresentaram razões Th-228/Th-232 entre 27 e 750, que excedem significativamente a unidade, caracterizando um alto grau de fracionamento isotópico entre esses núcleos. Como a maioria das análises efetuadas para as amostras de testemunhos forneceram resultados que demonstraram que o Th-228 está em equilíbrio radioativo secular como o Th-232, os mecanismos de lixiviação seletiva de Th-228 e/ou recuo do núcleo não parecem ser suficientes para justificar o elevado grau de desequilíbrio observado nas águas estudadas. O Th-228 é "filho" do Ra-228, que apresenta maior solubilidade que seu pai, o Th-232. Devido a sua meia-vida curta, o Th-228 começa a se formar em quantidades detetáveis logo nos primeiros meses após a produção de Ra-228 no testemunho e transporte preferencial para a água, causando um aparente enriquecimento na fração filtrada, insuficiente para empobrecê-lo nos testemunhos.

Esses resultados reforçam as observações efetuadas por Eisenbud et al. (1982) para as razões Th-228/Th-232 encontradas na fração filtrada de amostras de águas superficiais do Morro do Ferro e as conclusões de Franca et al. (1983) de que o rádio sofre lixiviação apreciável pela água de chuva que percola o depósito, permanecendo no solo o Th-228 produzido pelo decaimento do Ra-228.

Na Fig. 7 ilustram-se em função da pluviometria as razões Th-228/Th-232 determinadas neste trabalho, por Mickleley et al. (1982) e Lei (1984) para as águas subterrâneas e superficiais do Morro do Ferro, não estando representados os resultados apresentados na tabela 2, obtidos para as amostras dos furos de sondagem 5, 6 e 9 coletadas em dezembro de 1982.

Conforme pode-se observar, há boa correspondência entre o intervalo de variação dos valores encontrados neste trabalho com o determinado pelos outros pesquisadores.

Baseando-se em seus dados analíticos, Miekaley et al. (1982) sugeriram que as razões Th-228/Th-232 das águas subterrâneas aumentam da estação seca para chuvosa, comentando que na estação seca ocorreria pouca mistura entre as águas subterrâneas e superficiais, permitindo o decaimento do excesso de Th-228, e, na estação chuvosa, ocorreria mistura entre as águas subterrâneas e superficiais recentes, enriquecidas em Th-228. Por outro lado, os resultados das análises de Lei (1984) não indicaram variabilidade relacionada com a pluviometria.

As razões Th-228/Th-232 determinadas no presente trabalho para as amostras de setembro/1983 mostram-se, de uma maneira geral, superiores às das amostras de dezembro/1982 e março/1983. Embora essas amostras não sejam representativas da época de estiagem, a pluviometria de setembro de 1983 indica a ocorrência do início do período de chuvas, logo após a estiagem típica dos meses de julho e agosto de 1983. A elevação dos valores dos resultados obtidos talvez possa ser justificada pelo fato de que o Ra-228 produzido nos sedimentos e não lixiviado durante o período de estiagem estaria sendo transportado pela água de infiltração proveniente da incidência das primeiras chuvas. Provavelmente esse mecanismo justificaria em parte os acréscimos observados neste trabalho, não se descartando a possibilidade de presença de outros fatores atuantes, que permanecem sem identificação clara até o momento.

#### CONCLUSÃO

A partir da determinação das atividades dos isótopos Th-232 e Th-228 nas amostras de testemunhos e águas analisadas, verificou-se as seqüências da interação entre as fases líquida e sólida no sistema aquífero do Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG), situado no manto de alteração derivado de intenso intemperismo in situ. Nos testemunhos de sondagem, estes nuclídeos de tório apresentaram-se em equilíbrio radioativo ao longo de praticamente todo o trecho analisado. Já as razões Th-228/Th-232 encontradas nas águas excederam significativamente a unidade, sugerindo a ocorrência de transporte preferencial de Ra-228 pelo meio líquido e produção do Th-228 excedente pela sucessão de decaimento beta-beta. Os resultados obtidos caracterizaram desequilíbrios acentuados em virtude da dinâmica interação entre a água de infiltração e os estratos do aquífero, reforçando as conclusões de outras pesquisas realizadas na área.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, E.B. - 1977 - Geology of the bauxite deposits of the Poços de Caldas district, State of Minas Gerais, Brazil. Stanford, Stanford University (Ph. D. dissertation).
- BACON, M.P. & ANDERSON, R.P. - 1982 - Distribution of thorium isotopes between dissolved and particulate forms in the deep sea. J. Geophys. Res., **87**: 2045-2056.
- BENNETT, J.T.; KRISHNASWAMI, S.; TUREKIAN, K.K.; NELSON, W.C. & HOPSON, C.A. - 1982 - The Uranium and thorium decay series nuclides in Mt. St. Helens effusives. Earth Planet. Sci. Lett., **60**: 61-69.
- CARPENTER, R.; PETERSON, M.L.; BENNETT, J.T. & SOMAYAJULU, B.L.K. - 1984 - Mixing and cycling of uranium, thorium and Pb-210 in Puget Sound sediments. Geochim. Cosmochim. Acta, **48**: 1949-1963.

- EISENBUD, M.; COWAN, G.A.; DUGUID, J.O. & KRAUSKOPF, K. - 1979 - Findings and recommendations concerning the thorium deposit of the Morro do Ferro. New York, New York University Medical Center, 21 pp.
- LEI, W.; BALLAD, R.; KRAUSKOPF, K.; FRANCA, E.P.; CULLEN, T.L. & FREEBORN, P. - 1982 - Mobility of thorium from the Morro do Ferro. In: "Environmental migration of long-lived radionuclides". Vienna, IAEA, 739-755.
- FRANCA, E.P.; CAMPOS, M.J.; CARLOS, M.; LOBÃO, N.; PFEIFFER, W.C. & TRINDADE, H. - 1983 - Radium, leaching, transport and retention at Morro do Ferro, Poços de Caldas, MG. *INIS - BR - 86*, 261-262.
- FREEBORN, P. - 1980 - Examination of thin sections from the Morro do Ferro, Brazil. Pennsylvania State University.
- FUJIMORI, K. - 1982 - Silicato de terras raras e cheralita, minerais responsáveis pela anomalia no Morro do Ferro, Poços de Caldas, MG. In: "Congresso Brasileiro de Geologia". *Anais*, Salvador, SBG, 2: 669-671.
- \_\_\_\_\_ - 1983 - Migração de tório e outros elementos do Morro do Ferro. CNEP. Relatório de Pesquisa.
- IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A) - 1982 - Estudos para a caracterização do comportamento do lençol freático do Morro do Ferro - Poços de Caldas (MG), São Paulo, DNCA. *Relatório*, 16423 (22): 16 pp.
- JOSHI, L.U.; ZINDGDE, M.D. & ABIDI, S.A.H. - 1983 - Thorium series disequilibrium and geochemical process in estuarine sediments of Mandovi River. *J. Rad. Chem.*, 77 (1): 57-64.
- KAMATH, P.R.; KHAN, A.A.; RAO, S.R.; PILLAI, T.N.V.; BORKAR, M.L., GANAPATHY, S. - 1964 - Environmental natural radioactivity measurements at Trombay Establishment, In: "The Natural Radiations Environment". Chicago. The University of Chicago Press, 957-978.
- KAUFMAN, A. - 1969 - The Th-232 concentration of surface ocean water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33: 717-724.
- \_\_\_\_\_; LI, Y.H. & TUREKIAN, K.K. - 1981 - The removal rates of  $^{234}\text{Th}$  and  $^{228}\text{Th}$  from waters of the New York Bight. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 54: 385-392.
- KNAUSS, K.G.; KU, T.L. & MOORE, W.S. - 1978 - Radium and thorium isotopes in the surface of waters of the East Pacific and Coastal Southern California. *Earth Planet Sci. Lett.*, 39: 235-249.
- KU, T.L. - 1976 - The uranium-series methods of age determination. *An. Rev. Earth Plan. Sci.*, 4: 347-379.
- LANSMUR, D. & HERMAN, J.S. - 1980 - The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 44: 1753-1766
- LEDERER, C.M.; HOLLANDER, J.M. & PERLMAN, I. - 1967 - *Table of isotopes* 6th. edition, New York, John Wiley & Sons.
- LEI, W. - 1984 - Thorium mobilization in a terrestrial environment. New York, New York University Medical Center, 414 pp. (Ph. D. Dissertation).
- LINSALATA, P. - 1980 - Unpublished Data. Tuxedo, N.Y., New York University Medical Center, Personal Communication to Wayne Lei.
- MIEKELEY, N.; VALE, M.G.R.; TAVARES, T.M. & LEI, W. - 1982 - Some aspects of the influence of surface and ground water chemistry on the mobility of thorium in the "Morro do Ferro" Environment. In: "Scientific Basis for Nuclear Waste Management V". New York, North-Holland/Elsevier Science Publishing Co., 725-733.
- MIYAKE, Y.; SUGIMURA, Y. & TSUBOTA, H. - 1964 - Content of uranium, radium, and thorium in river waters in Japan. In: "The Natural Radiation Environment". Chicago. The University of Chicago Press, 219-225.
- MOORE, W.S. & SACKETT, W.W. - 1964 - Uranium and thorium series disequilibrium in sea water. *J. Geophys. Res.*, 69: 5401-5405.

- MOORE, W.S. - 1981 - The thorium isotope content of ocean water. Earth Planet. Sci. Lett., 53: 419-425.
- NOZAKI, A.; HORIBE, Y. & TUSUBOYA, H. - 1981 - The water column distributions of thorium isotopes in the western North Pacific. Earth Planet Sci. Lett., 54: 203-210.
- OSMOND, J.K. - 1964 - The distribution of the heavy radioelements in the rocks and waters of Florida. In: "The Natural Radiation Environment". Chicago, The University of Chicago Press, 153-159.
- PARADELLA, W.R. & ALMEIDA FILHO, R. - 1976 - Condicionamento das mineralizações radioativas no Planalto de Poços de Caldas, baseado em imagens MSS do Landsat. In: "Congresso Brasileiro de Geologia" Anais. Ouro Preto, SBG, 3: 181-190.
- SIMPSON, H.J.; TRIER, R.M.; TOGGSWEILER, J.R.; MATHIEU, G.; DECK, B.L.; OLSEN, C.R.; HAMMOND, D.S.; FULLER, C. & KU, T.L. - 1982 - Radionuclides in Mono Lake, California. Science, 216: 512-514.
- SOMAYAJULU, B.L.K. & GOLDBERG, B.D. - 1966 - Thorium and uranium isotopes in seawater and sediments. Earth Planet. Sci. Lett., 1: 102-106.
- THURBER, D.L. - 1965 - The concentrations of some natural radioelements in the waters of the Great Basin. Bull. Vulcanol., 28: 195-201.
- TITAYEVA, N.A. & VEKSLER, I.I. - 1977 - The State of radioactive equilibrium in the uranium and thorium series as an indicator of migration of radioactive elements and active interaction between phases under natural conditions. Geokem. Intern., 14 (4): 99-107.
- TOLBERT, G.E. - 1955 - Preliminary report on the Morro do Ferro thorium bearing rare-earths deposit, Poços de Caldas Plateau, Brazil. Conselho Nacional de Pesquisas.
- WAHLGREN, M.A. & ORLANDINI, K.A. - 1982 - Comparison of the geochemical behavior of plutonium, thorium and uranium in selected North American lakes. "Environmental Migration of Long-Lived Radionuclides". Vienna, IAEA, 757-774.
- WANG, J.M.; BALLAD, R.; GREVALDI, P. & LEI, W. - 1983 - Extraction of thorium, uranium and cerium from freshwater using manganese dioxide coprecipitation. J. Radioanal. Chem., 76: 105-108.
- WEDOW, H. - 1967 - The Morro do Ferro Thorium and Rare-Earth Ore Deposit. Poços de Caldas District, Brazil. Washington, U.S. Gov't. Printing Office. U.S. Geological Survey Bulletin, 1185-D: 35 pp.

Profundidade (metros)	Massa (gramas)	Tempo de contagem (minutos)	N <sub>228</sub> (contagens)	N <sub>232</sub> (contagens)	Th-228/Th-232 <sup>(*)</sup>
1,00	0,49	14	137	139	0,99 ± 0,12
2,53	0,54	23	273	281	0,97 ± 0,08
3,75	0,47	19	236	222	1,06 ± 0,10
4,98	0,48	10	198	200	0,99 ± 0,10
7,86	0,51	38	294	293	1,00 ± 0,08
9,38	0,52	57	840	801	1,05 ± 0,05
10,63	0,51	36	346	312	1,11 ± 0,09
11,68	0,52	46	348	305	1,14 ± 0,09
12,88	0,48	93	128	118	1,09 ± 0,14
15,46	0,48	20	181	180	1,01 ± 0,11
18,75	0,52	71	1055	662	1,59 ± 0,08
21,15	0,49	39	383	375	1,02 ± 0,07
26,60	0,52	33	244	200	1,22 ± 0,12

(\*) - incerteza analítica correspondente a 1σ

Tabela 1 - Razão isotópica Th-228/Th-232 nas amostras de testemunhos do furo de sondagem 5.



Furo de sondagem	Data de coleta	Volume analisado (litros)	Tempo de contagem (horas)	N <sup>228</sup> (contagens)	N <sup>232</sup> (contagens)	Th-228/Th-232 (*)
1	09/03/83	19,0	121	4182	129	32 ± 3
1	27/05/83	17,6	20	9379	38	246 ± 58
2	22/12/82	19,0	5	1370	39	35 ± 6
2	28/09/83	16,8	17	12396	125	99 ± 10
3	09/03/83	19,0	20	2456	67	36 ± 4
3	27/09/83	17,6	24	1019	11	90 ± 29
4	22/12/82	19,0	7	1548	42	37 ± 6
4	27/09/83	16,8	30	6985	38	184 ± 39
5	22/12/82	18,0	3,2	14999	20	750 ± 168
5	28/09/83	17,6	1	33671	58	580 ± 77
6	22/12/82	18,0	139	695	ND	-
6	28/09/83	17,6	17	8301	40	205 ± 41
9	22/12/82	18,0	22	1439	ND	-
9	27/09/83	16,3	15	1429	31	46 ± 10
Vertedouro	09/03/83	19,0	16	1712	62	27 ± 3
Vertedouro	22/09/83	15,2	26	9872	76	129 ± 16

(\*) - incerteza analítica correspondente a 1 σ

ND - não detectado

Tabla 2 - Razão isotópica Th-228/Th-232 nas águas subterrâneas e superficiais do Morro do Ferro.

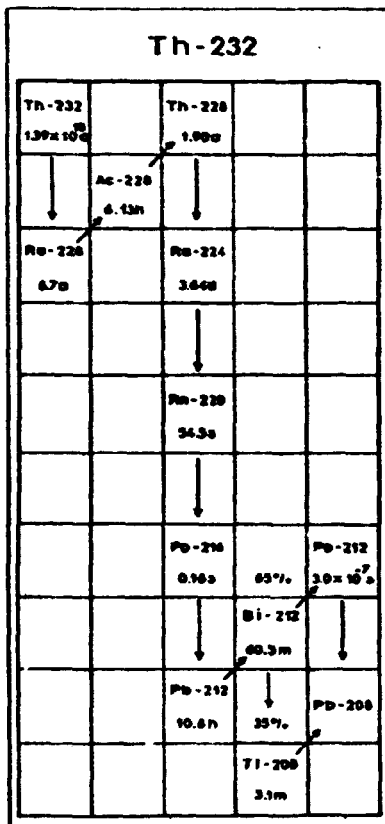


Fig. 1 - A cadeia natural de decaimento 4n. Segundo Ku (1976).

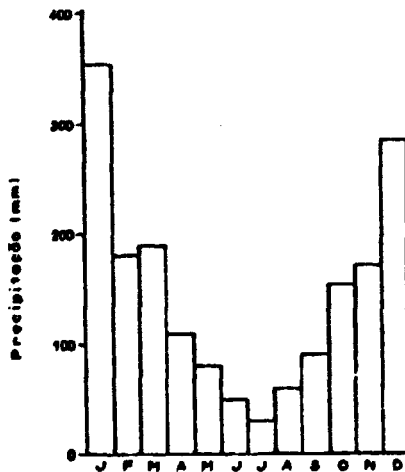


Fig. 2 - Pluviometria média mensal entre 1978 e 1985 no posto meteorológico da Divisão de Proteção Radiológica e Controle Ambiental do Departamento de Segurança da Nuclebrás.

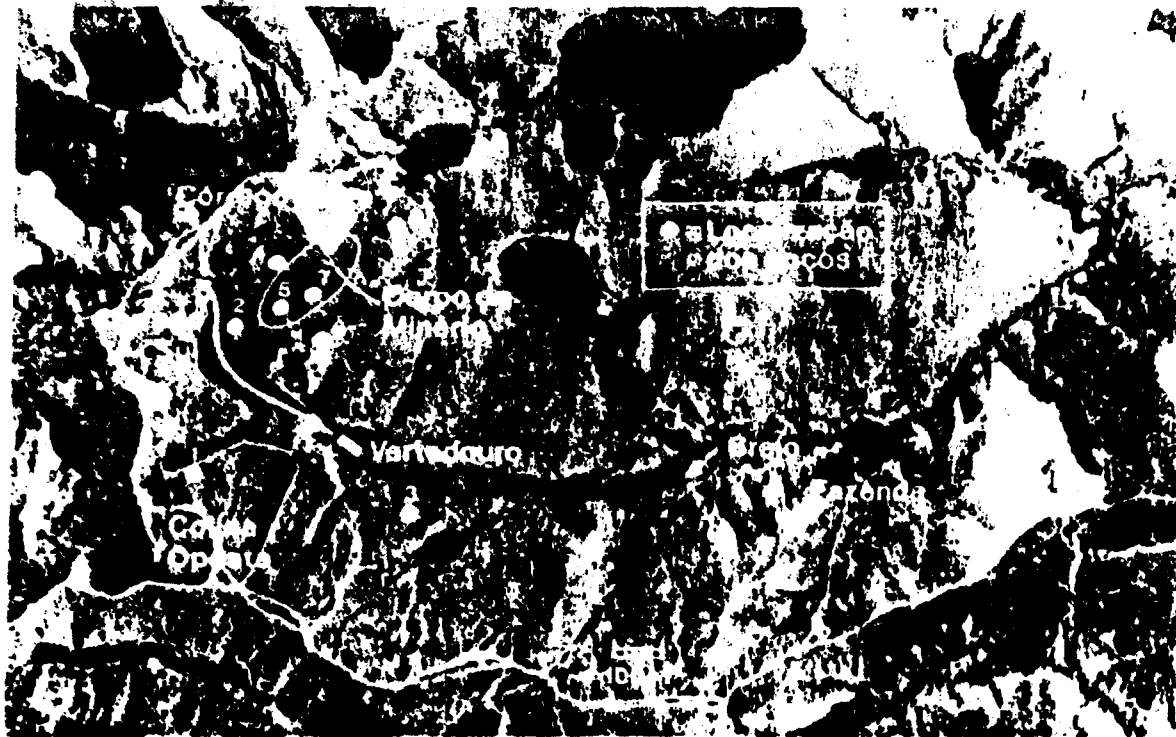
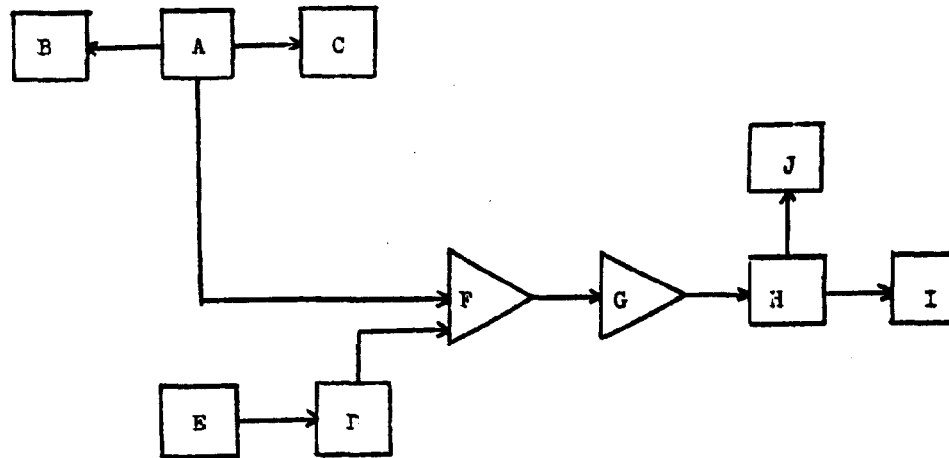


Fig. 3 - Fotografia aérea da região do Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG).  
 Cedida pelo Dr. Eduardo Penna Franca, Instituto de Biofísica, UFRJ,  
 Rio de Janeiro.



- A- Detetor de barreira de superfície, ORTEC BA-026-450-300  
 B- Bomba de vácuo, Welch Scientific Co., Mod. 1402  
 C- Vacuômetro Varian, NRC 804-A  
 D- Fonte de polarização do detetor, ORTEC 428  
 E- Fonte de alimentação do sistema, ORTEC 402M  
 F- Pré-Amplificador, ORTEC 109A  
 G- Amplificador, ORTEC 485  
 H- Analisador Multicanal, Norland IT-5300, 1024 canais  
 I- Teletipo, Teletype Corporation  
 J- Registrador X-Y, HP 7034A

Figura 4- Diagrama de bloco do espectrômetro alfa com detetor de barreira de superfície

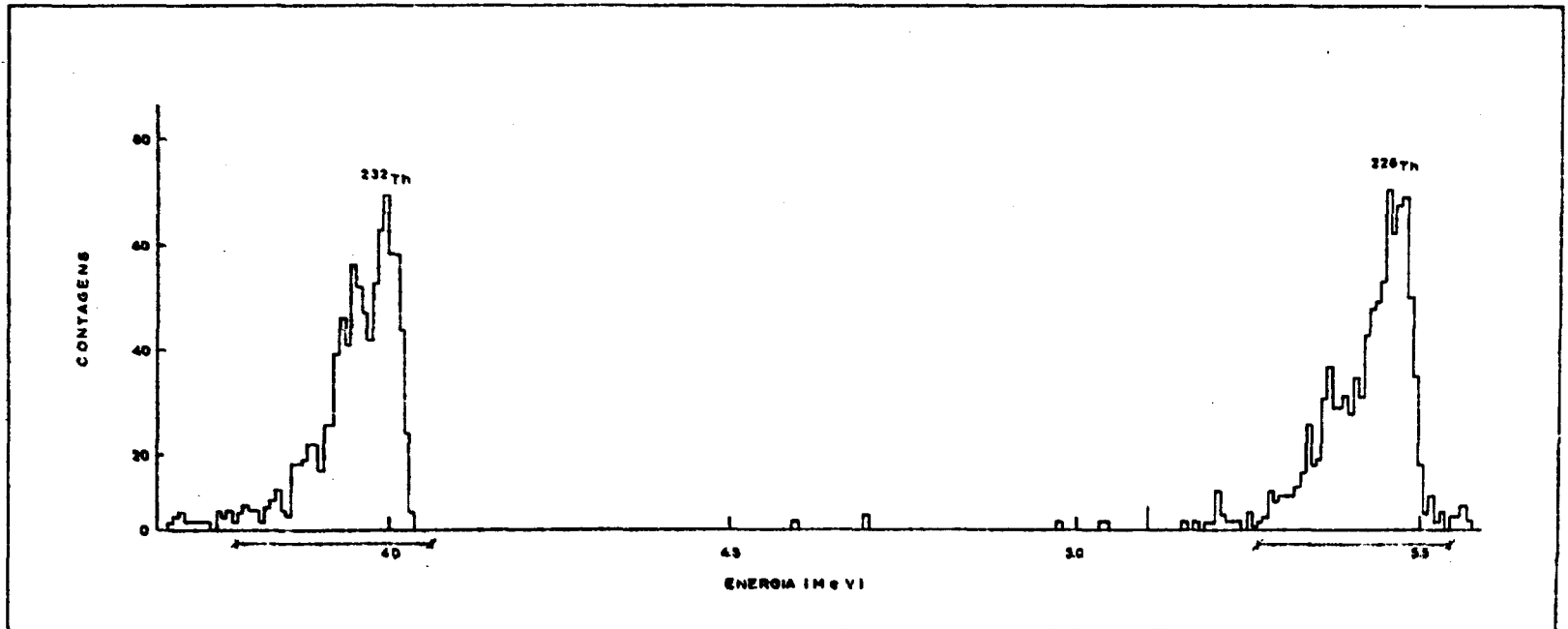


Fig. 5 - Espectrograma alfa do tório extraído da amostra de testemunho de sondagem do furo 5, proveniente de 9,36 metros de profundidade.

1884

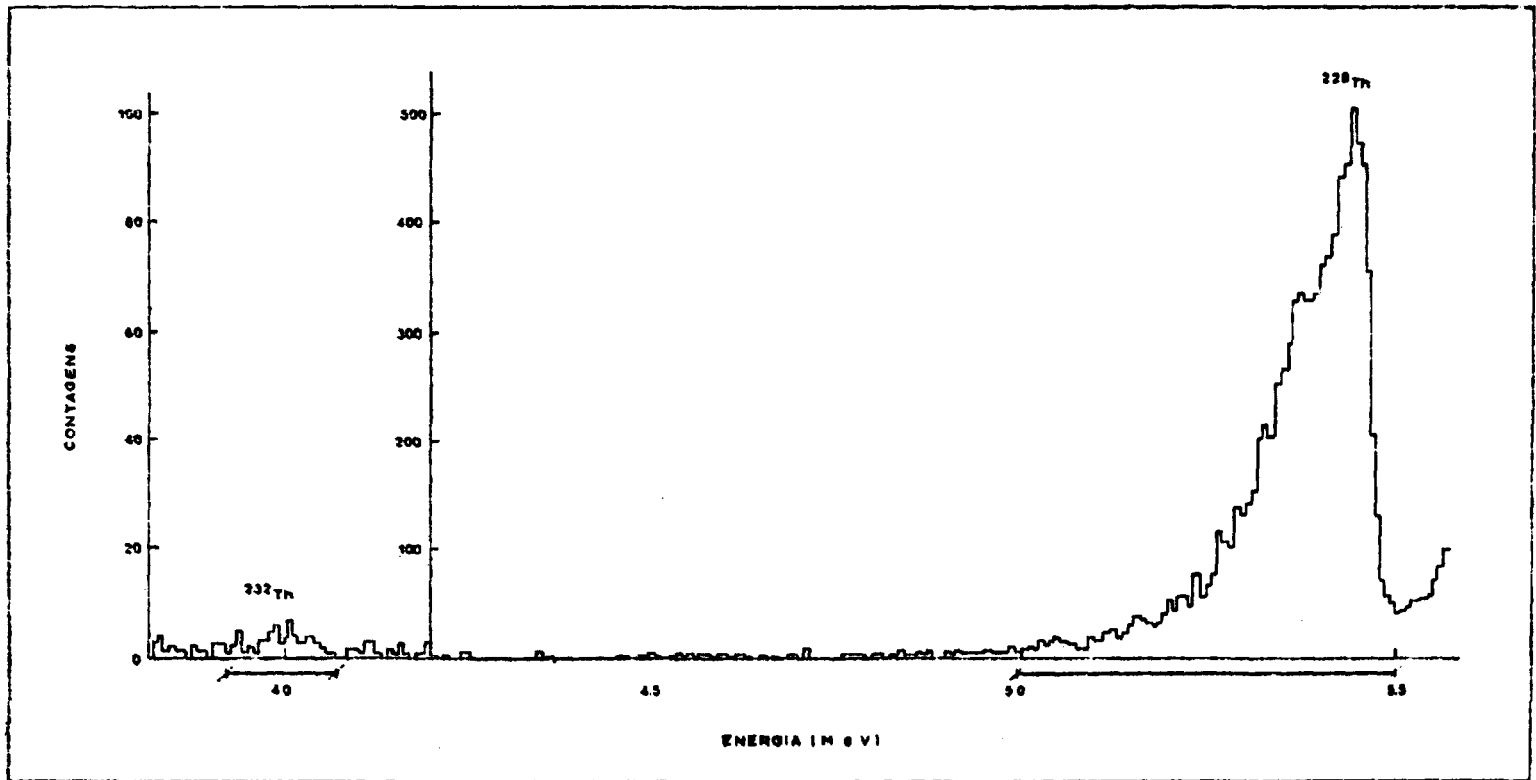


Fig. 6 - Espectrograma alfa do tório extraído da amostra de água subterrânea do furo de sondagem 1, coletada em 27/9/83.

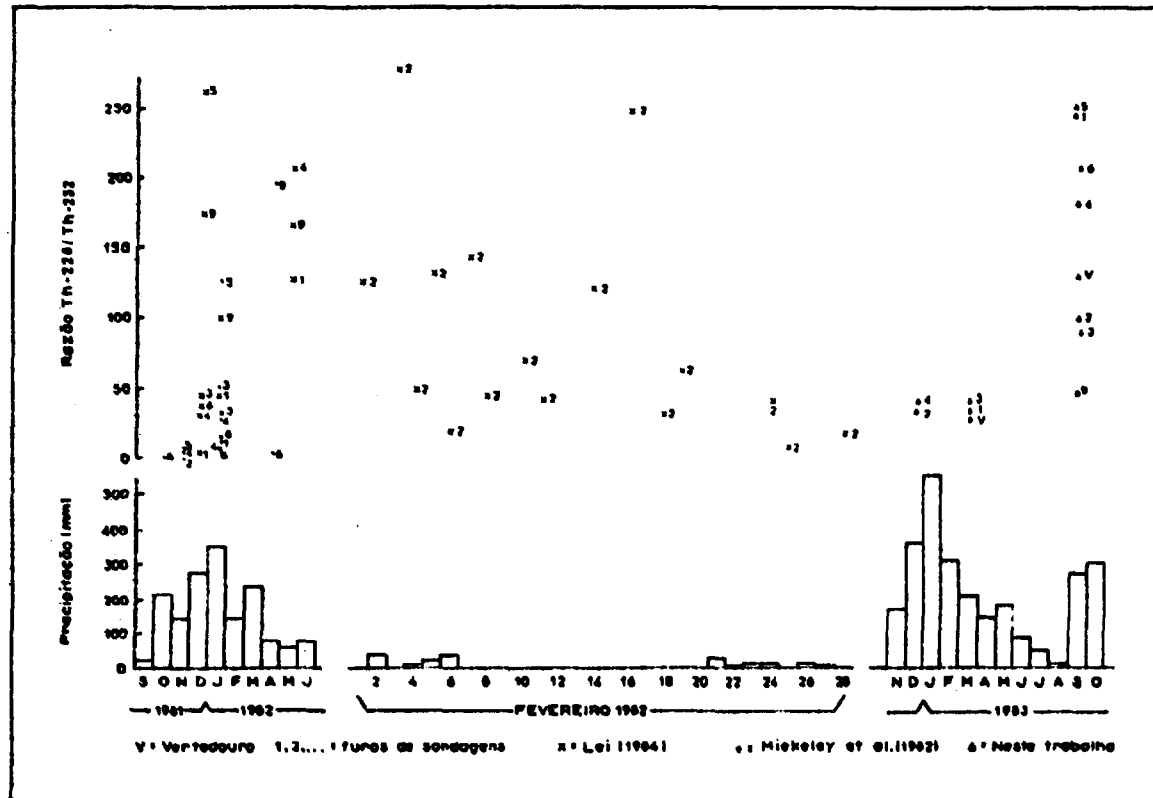


Fig. 7 - Razões isotópicas Th-228/Th-232 encontradas por vários pesquisadores no Morro do Ferro.