

ETAPAS ANALÍTICAS PARA MENSURAÇÃO
DE RADÔNIO-222 E USO NA AVALIAÇÃO
DA RADIOATIVIDADE DAS ÁGUAS DE ÁGUAS
DA PRATA (SP)

J.L.N. de Lima

P. G. Geociências, Área de Concentração: Geociências e Meio Ambiente, IGCE-UNESP,
Campus de Rio Claro, SP

D.M. Bonotto

Departamento de Petrologia e Metalogenia, IGCE-UNESP, Campus de Rio Claro, SP

ABSTRACT

This work describes the analytical procedures developed at the Sector of Unstable Isotopes of the Laboratory of Geochemistry, belonging to the Department of Petrology and Metallogeny, located at the Institute of Geosciences and Exact Sciences of the University "Júlio de Mesquita Filho" of the State of São Paulo (UNESP) for the installation of a system for the measurement of Radon-222 in waters. The methodology settled was used for the evaluation of Rn-222 content in groundwaters from Paiol, Platina, Prata Radioativa, Vitória and Villela springs located at Águas da Prata, an important spa in São Paulo, Brazil. The obtained values are between 688.5 and 21,192.2 pCi/l which in general are compatible with the previous data obtained by other researchers, showing the suitability of the methodology settled. The Brazilian code for mineral waters allows to classify the studied waters as no radioactive (Paiol), weakly radioactive (Prata-Radioativa), radioactive (Platina), and strongly radioactive (Vitória and Villela). Furthermore, all the values are higher than the limit of 300 pCi/l established by the United States Environmental Protection Agency for the Rn-222 content in drinking waters, suggesting special care with its use by the population.

RESUMO

No presente trabalho, são descritas as etapas analíticas desenvolvidas no Setor de Isótopos Instáveis do Laboratório de Geoquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) para a instalação de linha de mensuração de Radônio-222 nas águas. A metodologia implantada foi utilizada para a quantificação do Rn-222 nas águas subterrâneas das fontes Paiol, Platina, Prata-Radioativa, Vitória e Villela, localizadas na Estância Hidromineral de Águas da Prata (SP). Os valores obtidos situam-se na faixa de 688,5 a 21192,2 pCi/l, os quais são compatíveis com os determinados por outros pesquisadores, comprovando a aplicabilidade da metodologia implantada a partir desse trabalho. Tais valores, ao serem comparados com os estabelecidos pelo Código de Águas Minerais do país, permitiram classificar as águas destas fontes como não radioativa (Paiol), fracamente radioativa (Prata-Radioativa), radioativa (Platina) e fortemente radioativa (Vitória e Villela). Por outro lado, todos eles ultrapassam o limite de 300 pCi/l proposto pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para o Rn-222 nas águas potáveis, sugerindo que especial atenção seja dedicada quanto à utilização destas águas pela população local.

INTRODUÇÃO

No ambiente hidrológico, vários radionuclídeos são de especial interesse devido sua importância radiotóxica, por exemplo, o urânio e alguns de seus filhos, como o Ra-226, o Rn-222 e o Pb-210. As determinações de radioatividade total têm sido empregadas para estabelecer limites para o público. Os limites de contaminação são indicados assumindo que toda a atividade alfa deve-se ao Ra-226 devido ao seu alto grau de radiotoxicidade, grande tendência de fixar-se nos ossos, meia-vida longa de 1622 anos

e grande potencial de produzir dano biológico por ser emissor alfa.

Existem vários padrões nacionais para limitar a exposição à radiação devido ao Ra-226 nas águas potáveis. A máxima concentração permitida na água sugerida pela Organização Mundial de Saúde é de 10 pCi/l (Who, 1972). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estabeleceu um limite para a atividade alfa total na água correspondente a 15 pCi/l (USEPA, 1975). O Ra-228 é um nuclídeo emissor beta presente na série de decaimento do tório, tendo esse órgão tam-

bém sugerido que: as águas destinadas ao abastecimento doméstico não devem apresentar teores de Ra-226 + Ra-228 excedentes a 5 pCi/l; se a atividade alfa total na água exceder a 5 pCi/l, então, Ra-226 necessita ser mensurado e se o resultado mostrar que o Ra-226 excede 3 pCi/l, então, Ra-228 deve ser determinado. Contudo, uma nova série de padrões foi recentemente proposta (USEPA, 1991), a qual estabelece um limite de 20 pCi/l, tanto para o Ra-226, quanto para o Ra-228, um valor que ainda é considerado temporário. No Brasil, a Portaria nº 36, de 19/01/90, do

Ministério da Saúde estabeleceu que para águas destinadas ao consumo humano, o valor de referência para a radioatividade de alfa total é de 0,1 Bq/l e beta total é de 1 Bq/l, os quais são equivalentes, respectivamente, a 2,7 e 27 pCi/l.

O gás radônio, há muito tempo, tem sido considerado como um importante elemento responsável pela radioatividade das águas, motivo pelo qual estudos teóricos envolvendo a sua emanção foram conduzidos por pesquisadores há mais de 60 anos (Flügge & Zimens, 1939). Os isótopos de radônio de ocorrência natural são: o Rn-222 da cadeia $4n+2$ (série do urânio, meia-vida = 3,82 dias), o Rn-220 da cadeia $4n$ (série do tório, meia-vida = 54,5 s), e o Rn-219 da cadeia $4n+3$ (série do actínio, meia-vida = 3,52 s). Dentre eles, o que mais tem sido empregado para caracterizar uma água radioativa é o Rn-222, devido a sua meia-vida razoavelmente longa quando comparada com a dos demais isótopos.

As descobertas recentes de altos níveis de Rn-222 no ar do interior das residências tem conduzido a investigações intensas dos processos naturais que controlam os níveis de radônio, tanto no solo, quanto nas águas subterrâneas (Nazaroff & Nero, 1988; Gundersen, 1988; Wanty & Gundersen, 1988). Ainda é incerto, contudo, se o radônio em águas potáveis constitui uma ameaça direta à saúde (Cross et al., 1985; Cothorn, 1987; Crawford-Brown, 1990); a principal preocupação com relação aos altos níveis de radônio em águas subterrâneas está relacionada com a possibilidade de que os níveis de radônio no ar do interior das residências possam ser mantidos pelo

radônio derivado da água de consumo (Hess et al., 1990; Lawrence et al., 1992). Na legislação brasileira, referência explícita a esse gás foi efetuada pelo Ministério da Saúde através de Portaria nº 1003, de 13/08/76, Resolução nº 25, ao estabelecer padrões de identidade e qualidade para as águas minerais e naturais de fonte.

Tendo em vista a importância atual desse gás e a carência de estudos enfocando a sua presença nas águas subterrâneas de nosso país, implantou-se no Setor de Isótopos Instáveis de Laboratório de Geoquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, metodologia para a sua mensuração nas águas, baseada na técnica de emanção, a qual constitui versão modificada daquela desenvolvida por outros autores (Lucas, 1957; Zereski, 1983; Sampa, 1978; Pereira, 1977), e que se destina também à execução de estudos envolvendo interações água-solo/rocha. O método implantado requereu a instalação de um sistema simples e de baixo custo, porém, com possibilidade de fornecer uma sensibilidade de mensuração elevada.

No presente trabalho são descritas as principais etapas analíticas e premissas empregadas para a quantificação deste nuclídeo a partir do método implantado, bem como os primeiros resultados na avaliação da radioatividade nas águas de fontes localizadas na Estância Hidromineral de Águas da Prata (SP).

ÁREA DE INVESTIGAÇÃO

A área selecionada para estudo situa-se na cidade de

Águas da Prata, delimitada pelas coordenadas $21^{\circ}56'11''S$ e $46^{\circ}44'39''W$, sendo conhecida por se constituir numa importante Estância Hidromineral no Estado de São Paulo. A primeira fonte de água mineral da região foi descoberta por Rufino Luiz de Castro Gavião, em 1876, nas terras da Fazenda Alegre. Até 1912, a fonte ficou esquecida, só sendo redescoberta com a construção das primeiras casas ao redor da Companhia Mogiana de Estradas de Ferro. A partir daí, as fontes foram exploradas, a região desenvolveu-se e o povoado, em 23/11/25, foi transformado em distrito. Em 3/7/35, Águas da Prata foi elevada à categoria de município e Estância Hidromineral, desmembrando-se de São João da Boa Vista.

A área investigada localiza-se na borda ocidental do complexo alcalino de Poços de Caldas, o qual é de forma circular com um diâmetro médio de 33 km, área de aproximadamente 800 km², altitude entre 1300 e 1600 m e topografia caracterizada por vales, montanhas e colinas revestidas por gramíneas. O planalto é uma estrutura anelar de idade mesozóica, abrangendo uma suite de rochas alcalinas vulcânicas e plutônicas, principalmente fonólitos e nefelina sienitos. A história evolutiva começa com um vulcanismo principal envolvendo ankartritos, lavas fonolíticas e rochas vulcanoclásticas, seguidos por uma subsidência da caldeira e intrusão de nefelina sienitos formando diques anelares menores e estruturas circulares e, finalmente, a intrusão de nefelina sienitos portadores de eudialita (Ellert, 1959).

Águas da Prata possui uma altitude de 843 m, sendo limitada pelo dique anelar de

tinguaíto a oeste e por escarpa acentuada de rochas clásticas a leste (Fig. 1). Corresponde a uma fossa tectônica evidenciada pelos rebaixamentos de blocos através de falhamentos no dique anelar (Szikszay, 1981). As rochas de origem vulcânica como tufos, brechas e aglomerados são encontradas ao longo do Vale do Quartel, na saída para Poços de Caldas, ocorrendo, também, boas exposições de lavas fonolíticas, assentadas sobre sedimentos ou intercaladas com tufos e brechas com acamamento e mergulhos quase sempre dirigidos para o interior do maciço (Migliorini Jr. et al., 1983). Os sedimentos anteriores às atividades do magma alcalino ocorrem em grandes afloramentos, formando pacotes de mais de 100 m de espessura, constituídos, na base de folhelhos, com intercalações de camadas arenosas e, no topo de arenitos, com estratificação cruzada. Nos sedimentos, ocorrem intrusões de diabásio, que aparecem em diques e pequenos sills irregulares, aflorando principalmente ao norte de Águas da Prata (Migliorini Jr. et al., 1983).

Selecionaram-se para amostragem as seguintes fontes do município de Águas da Prata: Vitória, Platina, Paiol, Prata-Radioativa e Villela. Elas pertencem ao contexto geológico referido, tendo Szikszay (1981) descrito os litotipos relacionados com a surgência (Fig. 1). Elas situam-se na área urbana do município e foram escolhidas por serem hidroquimicamente conhecidas, por apresentarem localização de fácil acesso para a coleta de amostras, por estarem relacionadas com diferentes litotipos e por possuírem análises de Rn-222 possíveis de serem comparadas.

A Fonte Platina surge de uma lente de fonólitos, que aparece no fundo do vale de um pequeno córrego. A Fonte Paiol localiza-se num vale, resultando de perfurações que variaram de 24 a 146 m de profundidade para aumentar a vazão inicial da nascente; as rochas encontradas foram tufos vulcânicos, nefelina sienitos e fonólitos. A Fonte Villela emerge ao pé de um paredão de arenito bastante silicificado, através de fraturas no sentido vertical e horizontal. A Fonte Prata-Radioativa surge das fraturas de arenito silicificado e recristalizado em contato com siltitos. A Fonte Vitória surge ao pé de uma elevação de diabásio, emergindo por circulação ascendente através das fissuras em fonólito e diabásio, que no local são recobertos por aluvião.

As águas destas fontes são de origem meteórica conforme mostraram os estudos isotópicos conduzidos por Szikszay (1981), envolvendo o $\delta^{18}\text{O}$ e o δD . Os resultados obtidos pela autora para os principais cátions e ânions dissolvidos permitiram determinar a fácies química destas águas: bicarbonatada sódica (Vitória, Platina e Paiol), bicarbonatada mista (Prata-Radioativa) e bicarbonatada sódio-magnésiana (Villela).

AMOSTRAGEM

A campanha de coleta de amostras foi realizada em julho de 1993, tendo sido evitados os frascos de plástico, uma vez que podiam gerar perdas de até 40% do Rn-222 dissolvido, após 5 dias de armazenagem (Zereski,

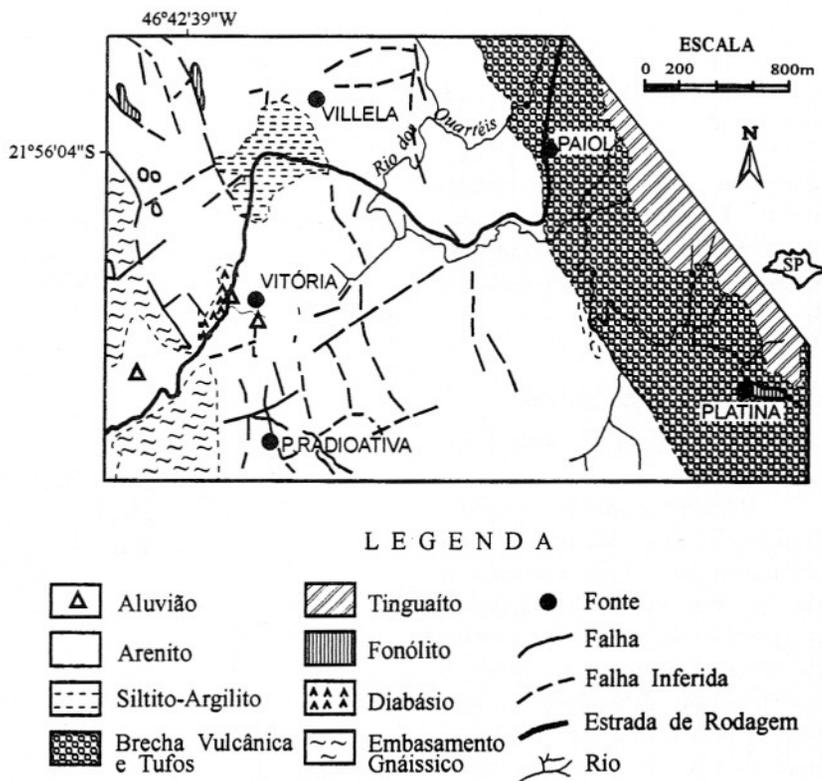


Figura 1 - Mapa geológico do município de Águas da Prata (SP), segundo Bittencourt & Taltasse (1972).

1983). As amostras foram recolhidas diretamente das fontes por meio de bomba manual acoplada aos frascos com capacidade de 1 litro cada. A coleta ocorreu o mais próximo possível do local de surgência das fontes, tendo sido os frascos totalmente preenchidos e lacrados a fim de evitar a difusão do radônio para o ar. A vedação foi efetuada com rolha de borracha contendo dois tubos de nylon de 5 mm de diâmetro, usados para a degaseificação, sendo o mais longo vedado numa extremidade e perfurado com orifícios de 1 mm de diâmetro. Nos frascos, foram colocados rótulos contendo a identificação da fonte, a data e a hora da coleta, com o objetivo de se efetuar a correção da atividade do Rn-222 devido o seu decaimento. O tempo para o Rn-222 atingir o equilíbrio com o seu pai, o Ra-226, foi encontrado a partir da equação:

$$t = - \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{A2}{A6} \right] \quad (1)$$

onde λ é a constante de decaimento do Rn-222, e A2 e A6 correspondem, respectivamente, às atividades de Rn-222 e Ra-226.

A EXTRAÇÃO E DETECÇÃO DO Rn-222

Para a recuperação quantitativa do Rn-222, através de cada amostra, foi efetuada a passagem de um volume gasoso igual a 10 vezes o volume da amostra, numa taxa entre 1 e 1,5 l/minuto. Esse fluxo de gás passou através de três estágios de secagem: um frasco lavador de gases de 50 ml imerso em recipiente com gelo, duas ampolas preenchidas com CaCl₂

(3-8 mesh) e dois frascos lavadores de gases com capacidade de 500 ml preenchidos com H₂SO₄ concentrado. Após secagem, o fluxo passou através de um tubo de 20 cm em forma de U com 5 mm de diâmetro, preenchido com carvão vegetal ativado de 18 mesh e mantido a -80°C (CO₂ sólido-acetona) (Fig. 2a).

Esta armadilha foi acoplada a câmaras de cintilação evacuadas, inicialmente, até

pressões menores que 0,1 Torr, construídas com base no modelo de Lucas (1957) e consistindo de Erlenmeyer com dimensões compatíveis com o alcance médio das partículas α na atmosfera (Fig.3). Após tratamento adequado, as paredes internas dos recipientes haviam sido recobertas com solução de 5 a 10% de graxa de silicone em clorofórmio, às quais, depois da remoção do excedente, adicionou-se o cintilador ZnS(Ag). A

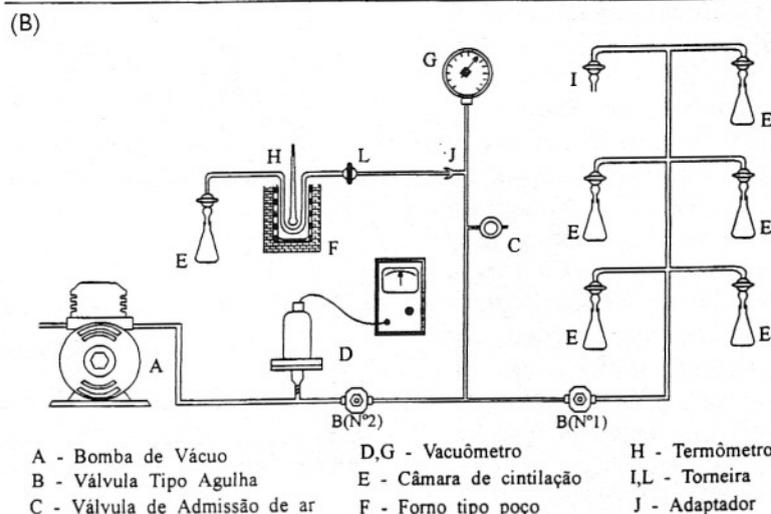
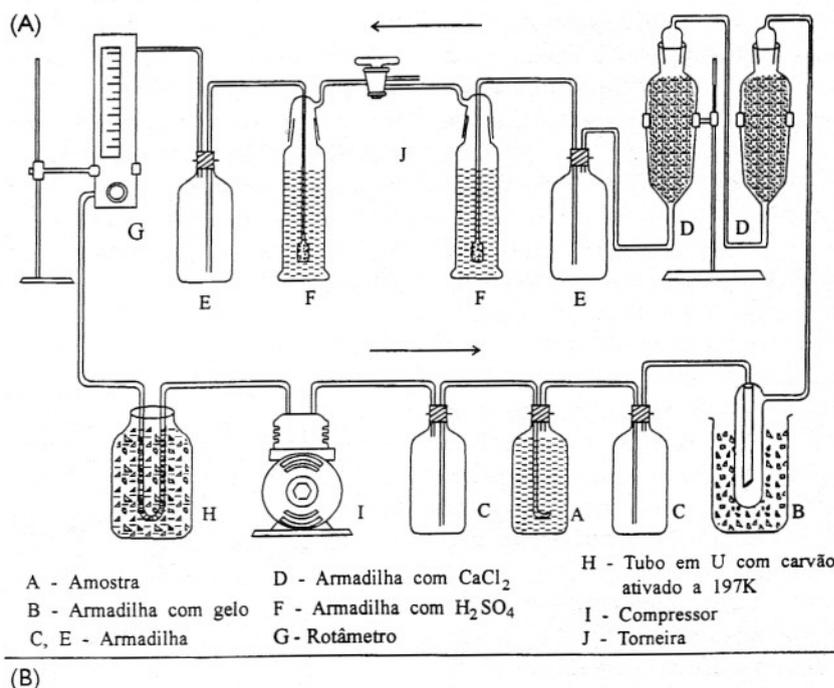


Figura 2 - Sistemas de (a) absorção e (b) transferência de Rn-222.

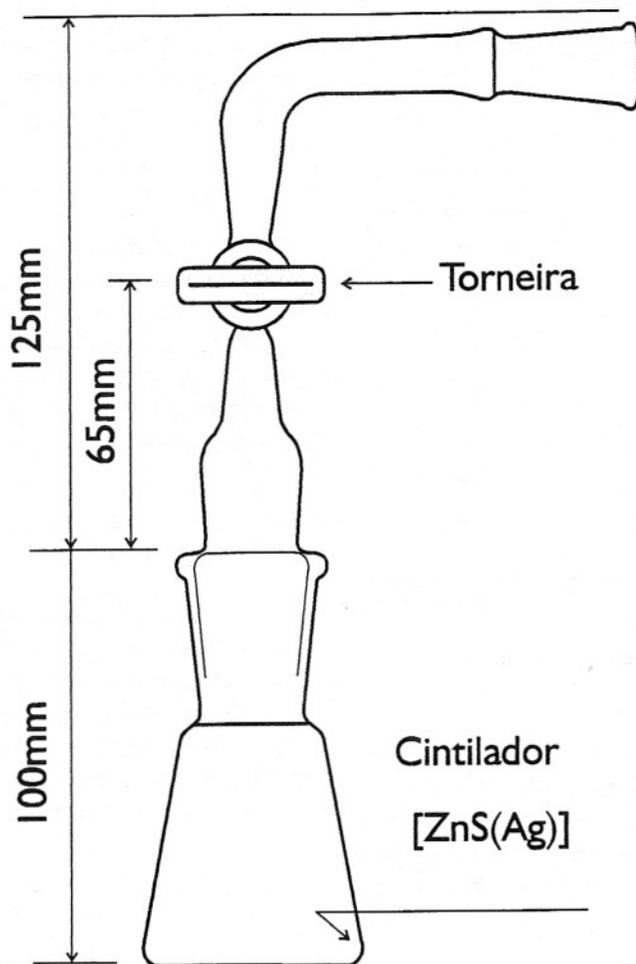


Figura 3 - Câmara de cintilação construída.

transferência do Rn-222 para as câmaras de cintilação foi efetuada inserindo-se o tubo em U em forno tipo poço mantido a 200°C (Fig.2b).

Quando as partículas alfa emitidas pelo Rn-222 interagem com o cintilador ZnS(Ag), ocorre a emissão de fótons na região do visível e ultra violeta (4500 Å), os quais são detectados por válvula fotomultiplicadora, consistindo de cátodo bialcalino e dinodos CsSb, acoplados opticamente por contato simples com a base da câmara cintiladora e mantida em recipiente escuro, isto feito

após um tempo suficiente (3 horas) para o Rn-222 atingir o equilíbrio radioativo com os seus produtos de decaimento de meia-vida curta (Fig. 4).

Os pulsos de saída da válvula fotomultiplicadora foram coletados em pré-amplificador acoplado diretamente à sua base, tendo, então, passado por um estágio de inversão de polaridade para compatibilizar a interligação com o amplificador linear do medidor de radiação utilizado, capaz de dar uma forma quase gaussiana ao pulso exponencial oriundo do pré-amplificador. A discriminação

das alturas de pulsos provenientes do amplificador foi realizada por analisador monocanal inserido no medidor de radiação, o qual possibilita que os pulsos sejam: transferidos para a monitoração externa; conduzidos para a contagem no medidor de taxa linear; transferidos para o módulo acústico ou conduzidos para a unidade de contagem/armazenamento e memória de dados. O medidor de radiação possui ainda um temporizador, cuja finalidade é de fixar o tempo em segundos no qual as contagens são efetuadas. Na Figura 5 consta diagrama esquemático do sistema de detecção implantado.

ETAPAS PRÉVIAS DE CALIBRAÇÃO

Vários ensaios preliminares foram realizados para operacionalizar o sistema de mensuração. Inicialmente, efetuou-se o levantamento da curva característica da válvula fotomultiplicadora, utilizando-se de cilindro de Al revestido internamente com ZnS(Ag) e contendo um disco de Pt com um depósito de U-232/Th-228 de atividade igual a 169,45 dpm para o U-232. A aplicação de tensões de 700 a 1200 V forneceu taxas de contagens entre 4 e 87930 cpm, definindo que, para 1000 V, a flutuação na medida foi menor que 1% (Fig. 6).

Testes efetuados em distintos cintiladores de ZnS(Ag) mostraram que o fabricado pela Helecon United States Radium Corporation apresentou o menor ruído de fundo (0,6 cpm). A adequabilidade do ar como gás de arraste foi avaliada através de medidas realizadas em câmaras de cintilação evacuadas e preenchidas com ar; os resultados obtidos estão ilustra-

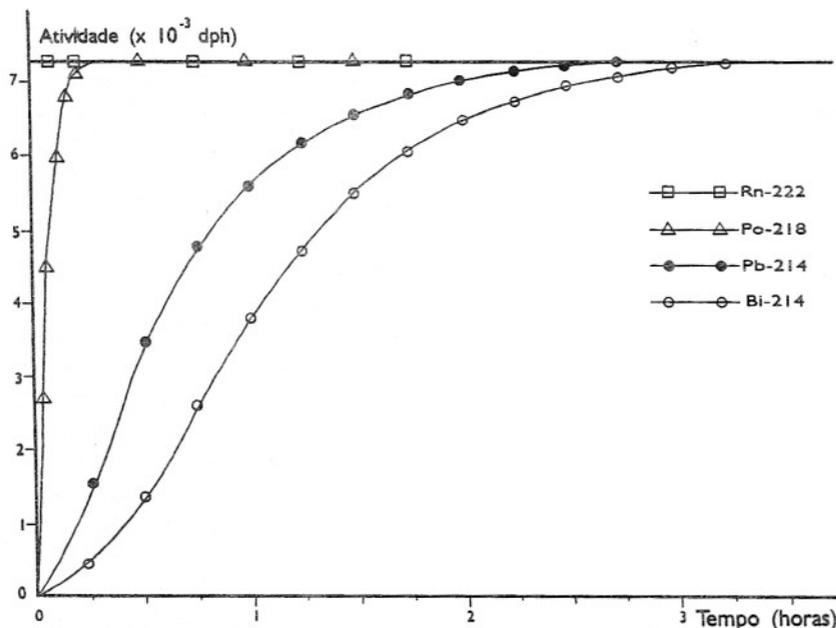


Figura 4 - Atividade do Rn-222 e de seus filhos em função do tempo.

dos na Tabela 1, os quais mostram que não há elevação significativa nos dois casos da taxa de contagem de fundo radioativo.

Para fins de preparação de padrões para a calibração das câmaras de cintilação, partiu-se de solução de Ra-226 de atividade igual a 0,5 pCi/ml e prepararam-se 5 padrões, cada um contendo uma atividade de Ra-226 (SA) correspondente a 1000 pCi. Então, cada frasco contendo o padrão permaneceu selado até a realização da calibração das câmaras de cintilação (tempo mínimo de 30 dias para o Ra-226 atingir o equilíbrio radioativo com o Rn-222).

A taxa de contagem (T_c) e o desvio padrão (σ_{T_c}) foram, respectivamente, obtidos pelas expressões:

$$T_c = \frac{N}{t_0} \quad (2),$$

$$\sigma_{T_c} = \frac{\sqrt{N}}{t_0} \quad (3),$$

onde N é o número de contagens devido ao Rn-222 e t_0 é o tempo de contagem da medida.

O número de contagens devido ao ruído de fundo (N_B)

das câmaras também foi determinado, sendo o seu desvio padrão (σ_B) expresso por:

$$\sigma_B = \frac{\sqrt{N_B}}{t_0} \quad (4).$$

A atividade real normalizada (A_n) foi obtida efetuando-se a diferença entre a taxa de contagem T_c e a taxa de contagem do ruído de fundo T_{c_B} ; o desvio padrão (σ_{A_n}) foi obtido pela expressão:

$$\sigma_{A_n} = [\sigma_{T_c}^2 + \sigma_B^2]^{1/2} \quad (5).$$

A atividade corrigida (A_d) devido ao decaimento do Rn-222 durante o tempo t , compreendido entre o início do processo de extração e o final de realização da medida, foi calculada a partir da equação:

$$A_d = A_n e^{\lambda t} \quad (6),$$

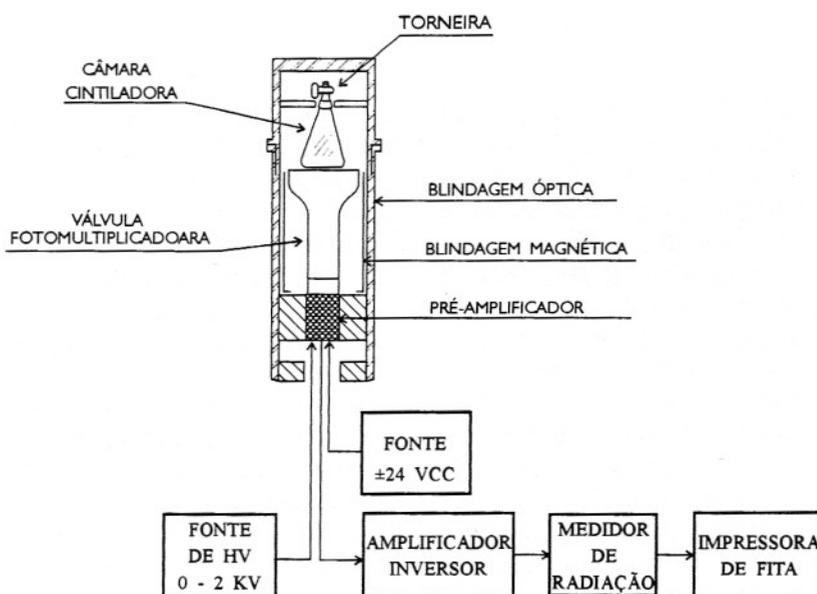


Figura 5 - Esquema do sistema de detecção e contagem do radônio.

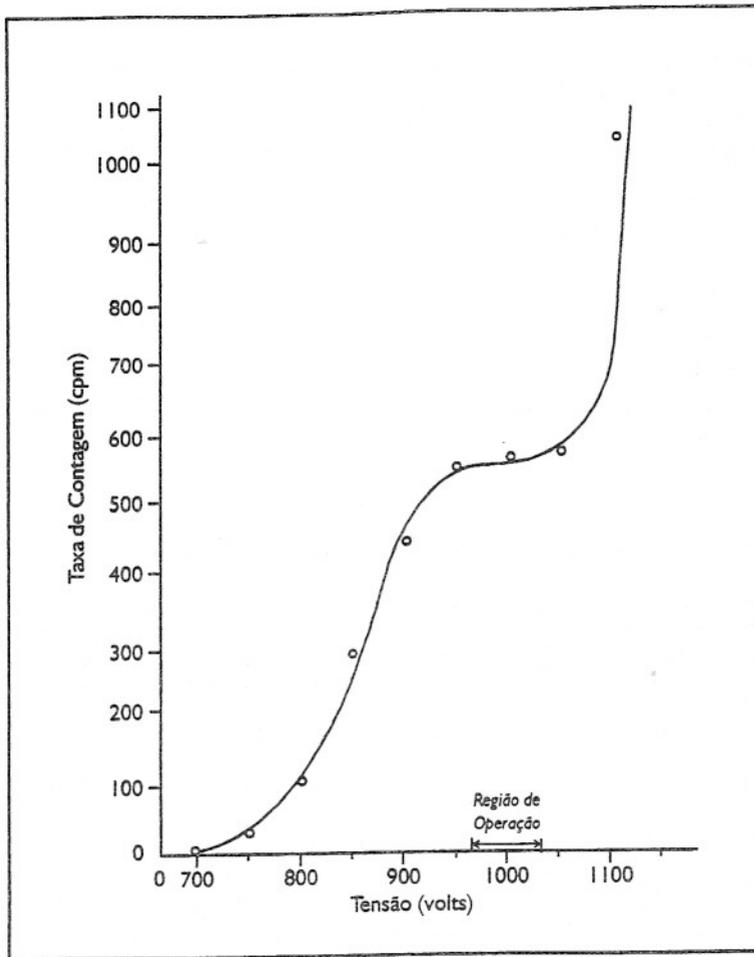


Figura 6 - Curva característica da válvula fotomultiplicadora Thorn EMI, modelo 9765B.

onde λ é a constante de decaimento do Rn-222.

O desvio padrão (σ_{Ad}) é calculado pela expressão:

$$\sigma_{Ad} = \sqrt{e^{2\lambda t}} \sigma_{An} \quad (7)$$

onde se assume que não há erro em λ e em t .

Finalmente, o parâmetro que representa a calibração da câmara cintiladora é obtido pela equação:

$$F_k = \frac{Ad}{SA} \quad (8)$$

Assumindo que não há

erro na atividade do padrão SA, o desvio padrão deste parâmetro é fornecido por:

$$\sigma_{Fk} = \frac{\sigma_{Ad}}{SA} \quad (9)$$

Na Tabela 2 constam os

Tabela 1 - Taxas de contagem nas câmaras de cintilação fabricadas sob condições de vácuo e contendo ar em seu interior.

Câmara de Cintilação	Contagens (cpm)	
	Vácuo	Ar
B	2,2	2,3
C	1,5	1,8
E	1,4	2,0

resultados experimentais relacionados com a obtenção destes parâmetros para quatro câmaras de cintilação construídas.

RADIOATIVIDADE DAS ÁGUAS

Para a aquisição dos dados relativos às amostras coletadas, baseou-se no mesmo procedimento usado para a calibração das câmaras cintiladoras, no que diz respeito à aplicação das equações 2 a 7. Na Tabela 3 constam os resultados obtidos, ressaltando-se, contudo, que nesta tabela e na equação 6, t corresponde ao intervalo de tempo entre a coleta da amostra e o final de realização da medida. Além disso, A_p corresponde à atividade calculada a partir da atividade corrigida A_d e calibração do frasco F_k , de acordo com a seguinte equação:

$$A_p = \frac{Ad}{F_k} \quad (10)$$

O desvio padrão (σ_{Ap}) dessa atividade é computado a partir da seguinte expressão:

$$\left[\frac{\sigma_{Ap}}{Ap} \right]^2 = \left[\frac{\sigma_{Ad}}{Ad} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{Fk}}{F_k} \right]^2 \quad (11)$$

As atividades de Rn-222, expressas na Tabela 3, foram divididas pelo volume de amos-

Tabela 2 - Calibração das câmaras de cintilação construídas.

Câmara de Cintilação	SA (pCi)	Tc ± σ _{Tc} (cpm)	Tc _B ± σ _B (cpm)	An ± σ _{An} (cpm)	t (minutos)	Ad ± σ _{Ad} (cpm)	F _K ± σ _{Fk} (cpm/pCi)
A	1000	218,7 ± 4,7	5,14 ± 0,3	213,6 ± 4,7	238	225,3 ± 4,8	0,22 ± 0,005
B	1000	252,7 ± 5,0	2,54 ± 0,2	250,2 ± 5,0	245	260,6 ± 5,2	0,26 ± 0,005
C	1000	409,6 ± 4,8	1,56 ± 0,2	408,0 ± 4,8	238	422,0 ± 4,9	0,42 ± 0,005
D	1000	258,2 ± 4,1	1,35 ± 0,1	256,8 ± 4,1	250	266,4 ± 4,3	0,27 ± 0,005

Tabela 3 - Resultados obtidos na análise de Rn-222 nas águas das fontes de Águas da Prata (SP).

Fonte	Volume (l)	Câmara de Cintilação	Tc ± σ _{Tc} (cpm)	Tc _B ± σ _B (cpm)	A _n ± σ _{An} (cpm)	t (min.)	Ad ± σ _{Ad} (cpm)	A _p ± σ _{Ap} (pCi)	Concentração (pCi/l)
Vitória	1	D	5169,02 ± 7,19	1,35 ± 0,15	5167,65 ± 7,19	691	5637,13 ± 2,99	21192,22 ± 318,73	21192,22
Villela	1	B	4684,50 ± 6,84	2,54 ± 0,21	4681,96 ± 4,54	1260	5486,44 ± 2,56	21020,84 ± 402,82	21020,84
Paíol	1	B	167,17 ± 1,29	2,54 ± 0,21	164,63 ± 1,31	696	179,69 ± 0,55	688,47 ± 13,36	688,47
Platina	1	A	830,00 ± 2,88	5,14 ± 0,29	824,86 ± 2,89	785	910,51 ± 1,28	4046,71 ± 90,10	4046,71
Prata Radioativa	1	C	1414,50 ± 3,76	1,56 ± 0,16	1412,94 ± 3,76	652	1533,76 ± 1,52	3634,50 ± 43,21	3634,50

tra coletado, obtendo-se, assim, a concentração de Rn-222 em pCi/l. Esses valores estão representados na última coluna da Tabela 3, os quais foram comparados com os determinados por outros autores para amostras das mesmas fontes. Registra-se, porém, que tal comparação é difícil, por se tratarem de determinações efetuadas por diferentes métodos e em diversas épocas, sendo alguns dados muito antigos. Por exemplo, Bonotto (1982) empregou um detector portátil de radônio Modelo RD200, da EDA Electronics, e obteve taxas de contagens entre 476,4 e 16930,8 cpm para amostras de águas das mesmas fontes, contudo, nota-se que o autor não utilizou um padrão de atividade

de conhecida para a calibração, o que torna os seus dados inadequados para essa comparação.

Os dados expressos na mesma unidade de concentração utilizada no presente trabalho encontram-se relacionados na Tabela 4. Dentre eles, nota-se que o trabalho de Szikszay & Sampa (1982) consistiu de um estudo sistemático conduzido através de um ano hidrológico, no período de maio de 1978 a abril de 1979, sendo, por isso, relativamente abundantes em relação aos demais dados. Apesar de ter sido empregada a técnica de cintilação líquida, diversa daquela implementada no presente trabalho, nota-se que os dados obtidos para as fontes Paíol, Platina e

Prata-Radioativa situam-se dentro dos intervalos obtidos por Szikszay & Sampa (1982). Embora os valores encontrados para as amostras de água das fontes Villela e Vitória situem-se um pouco abaixo do limite inferior determinado pelas autoras, consideram-se satisfatórios todos os resultados obtidos pelo método implementado, tendo em vista sua grande aplicabilidade no estudo da radioatividade relacionada com os processos de interação solo/rocha-água.

A Resolução nº 25 de 1976 define como radioativas as águas que contêm radônio em dissolução, obedecendo os seguintes limites: fracamente radioativas - as que apresentam, no mínimo, um teor de radônio

Tabela 4 - Resultados obtidos por outros autores para o teor de Rn-222 nas águas das fontes de Águas da Prata (SP) analisadas neste trabalho.

Fonte	Intervalo de concentração (pCi/l)	Referência
Paíol	305 ----- 743	(7)
	1.290 ----- 6.200	(1) (2) (3) (5)(6) (8) (9)
Platina	2.585 ----- 4.783	(7)
	2.440 ----- 18.200	(1) (2) (3) (6) (8)
Prata		
Radioativa	1.696 ----- 5.909	(7)
Vitória	22.108 ----- 34.291	(7)
Vilella	23.254 ----- 50.006	(7)
	32.540 ----- 34.220	(1) (2) (3) (5) (8) (9)

(1) CETESB apud Hurter et al. (1983)

(2) Falcão (1978)

(3) Gonçalves (1932)

(4) Longo (1953)

(5) Longo (1967)

(6) Matos (1928)

(7) Szikszay & Sampa (1982)

(8) Szikszay & Teissedre (1977)

(9) Teixeira (1946)

compreendido entre 5 e 10 Unidades Mache; radioativas - as que apresentam um teor de radônio compreendido entre 10 e 15 Unidades Mache; fortemente radioativas - as que possuem um teor de radônio superior a 50 Unidades Mache. Segundo Prado (1938) apud Sampa (1978), um Mache corresponde à atividade de radônio contida num litro de água, sem levar em consideração seus produtos de decaimento e supondo que todas as partículas alfa emitidas fossem utilizadas, produzindo uma corrente de ionização igual à milésima parte de uma unidade eletrostática. Devido a dificuldades práticas envolvidas na mensuração, esta unidade há muito tempo não tem sido utilizada para expressar os resultados de radioatividade nas águas, optando-se pela mais tradicional, pCi/l. A correspondência entre ambas é de que 1000 pCi/l equivale a 2,75

Unidades Mache. Com base na referida Resolução, os resultados obtidos nas análises das amostras de águas das fontes de Águas da Prata permitem classificá-las como: não radioativa - Paíol; fracamente radioativa - Prata-Radioativa; radioativa - Platina e fortemente radioativa - Vitória e Vilella.

A importância assumida pelo radônio como causador de câncer pulmonar ou de câncer no estômago e intestinos levou vários organismos internacionais a estabelecerem limites para sua ingestão em águas potáveis. Por exemplo, o limite proposto pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para Rn-222 é de 300 pCi/l (USEPA, 1991). Conforme se nota, esse limite é ultrapassado em todas as amostras de Águas da Prata analisadas, o que acarreta especial atenção quanto à sua utilização pela população local.

CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento do presente trabalho, vários produtos foram gerados como: implementação de técnica de construção de câmaras cintiladoras utilizando materiais de fácil obtenção e baixo custo, as quais apresentaram um baixo ruído de fundo (entre 0,6 e 5,1 cpm), apropriado para a mensuração do teor de Rn-222 nas águas; projeto e desenvolvimento de linha de extração e transferência de Rn-222 para uma ou mais câmaras de cintilação, a partir de componentes nacionais, o que facilita a sua manutenção; construção de forno tipo poço, capaz de atingir temperaturas da ordem de 200°C, necessárias para a transferência do Rn-222 para as câmaras cintiladoras; construção de unidade dotada de fonte radioativa apropriada para o controle dos parâmetros pré-estabelecidos para o sistema eletrônico de contagem; construção de fonte de alimentação para pré-amplificador e amplificador inversor utilizados no sistema de detecção.

A metodologia implantada foi utilizada na quantificação do Rn-222 em amostras de água das fontes Platina, Paíol, Prata-Radioativa, Vilella e Vitória localizadas na Estância Hidromineral de Águas da Prata no Estado de São Paulo. Os valores encontrados situam-se na faixa de 688,5 a 21192,2 pCi/l, os quais são compatíveis com a maioria dos dados obtidos por outros investigadores e denotam a sua aplicabilidade.

AGRADECIMENTOS

A dois revisores anônimos pelas críticas e sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BITTENCOURT, I. & TALTASSE, P. (1972) Mapa geológico de Águas da Prata (SP). IG/USP.
- BONOTTO, D. M. (1982) Aplicação dos dados do fracionamento isotópico $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ nos aquíferos de Águas da Prata (SP). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 161 p.
- CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) Boletins de exame d'água.
- COTHERN, C. R. (1987) Estimating the health risks of radon in drinking water. *J. Am. Water assoc.*, **79**:153-158
- CRAWFORD-BROWN, D. J. (1990) Analysis of the health risk from ingested radon. In: C. R. Cothorn & P. A. Rebers (eds) *Radon, radium, and uranium in drinking water*. Lewis Publishers, Chelsea, p.17-26.
- CROSS, F. T.; HARLEY, N. H.; HOFMANN, W. (1985) Health effects and risks from ^{222}Rn in drinking water. *Health Physics*, **48**:649-670.
- ELLERT, R. (1959) Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. *Bol. Geol. FFCL USP*, **237**:5-64.
- FALCÃO, H. (1978) Perfil analítico de águas minerais. DNPM, Rio de Janeiro, Boletim 2 (49).
- FLÜGGE, S. & ZIMENS, K. E. (1939) Die bestimmung von korngrößen und diffusionskonstanten aus dem emaniervermögen (Die theorie der emaniermethode). *Z. Phys. Chem. (Leipzig) B*, **42**:179-220.
- GONÇALVES, A. D. (1932) Águas minerais do Brasil. Boletim do Ministério da Agricultura, Diretoria de Estatística da Produção, Rio de Janeiro (RJ).
- GUNDERSEN, L.C.S. (1988) Anomalously high radon in shear zones. In: M.C. Osborne & J. Harrison (eds.) *The 1988 Symposium on Radon and Radon Reduction Technology*, U.S. Env.Prot. Agency Pub. EPA/600/9-89/006a, p.27-44.
- HESS, C.T.; VIETTI, M.A.; LACHAPPELLE, E.B.; GUILLEMETTE, J.F. (1990) Radon transferred from drinking water into house air. In: C.R. Cothorn & R.A. Rebers (eds.) *Radon, radium and uranium in drinking water*. Lewis Publishers, Chelsea, p. 51-68.
- HURTER, S.J.; ESTON, S.M.; HAMZA, V.M. (1983) Coleção brasileira de dados geotérmicos - Série 2 - fontes termiais. Publicação IPT n° 1233, 111 p.
- LAWRENCE, E.P.; WANTY, R.B.; NYBERG, P.A. (1992) Contribution of ^{222}Rn in domestic water supplies to ^{222}Rn in indoor air in homes in Colorado. *Health Physics*, **62**:171-177.
- LONGO, O.W. (1953) A radioatividade da Fonte Áurea, Poá, Estado de São Paulo. *Revista do IGG*, **9**(1/2):122-156.
- LONGO, O.W. (1967) Águas radioativas no Estado de São Paulo. *Revista do IGG*, **19**:27-54.
- LUCAS, H.F. (1957) Improved low-level alpha-scintillation counter for radon. *Rev.Sc.Inst.*, **28**(9):680-683.
- MATOS, F.B. (1928) Estações climatéricas de São Paulo. Publicação da Secretaria da Agricultura, São Paulo.
- MIGLIORINI JR., D.; RUIZ, C.R.; SCAGNOLATTO, E.D.; PEREIRA, E. (1983) Projeto Boa Vista. Convênio Pró-Minério/IGCE-UNESP-Câmpus de Rio Claro. Relatório Final - Turma VII, 97 p.
- NAZAROFF, W.W. & NERO, A.V. (1988) *Radon and its decay products in indoor air*. John Wiley & Sons, New York, 518 p.
- PEREIRA, E.B. (1977) Caracterização da produção do Rn-222 no Campo do Cercado C-09, Poços de Caldas, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 120 p.
- PRADO, L.C. (1938) A radioatividade das fontes hidrominerais. São Paulo, Escolas Profissionais Salesianas.
- SAMPA, M.H.O. (1978) Estudo e desenvolvimento de métodos analíticos para a determinação da radioatividade natural em águas. Dissertação de Mestrado, IEA/USP, 151 p.
- SZIKSZAY, M. (1981) Hidrogeoquímica das fontes de Águas da Prata, Estado de São Paulo - Origem, classificação e caracterização. Tese de Livre-Docência, IG/USP, 1:191 p.
- SZIKSZAY, M. & TEISSEDE, J.M. (1977) Análise hidrogeoquímica preliminar das fontes dos arredores da Bacia de São Paulo. *Rev. Bras. Geoc.*, **7**:32-44.
- SZIKSZAY, M. & SAMPA, M.O.H. (1982) Variação da radioatividade nas águas de fontes da Estância de Águas da Prata. *Boletim IG/USP*, **13**:25-42.

- TEIXEIRA, A.S. (1946) Fontes hidrominerais do Estado de São Paulo. Publicação da Diretoria Geral do Departamento de Saúde de São Paulo, 9(28):137-354.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1975) Interim primary drinking water regulations. Federal Register 158, Washington, 34323.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1991) National primary drinking water regulations - radionuclides: proposed rule. Federal Register 56, Washington, p. 33050-33127.
- WANTY, R.B. & GUNDERSEN, L.C.S. (1988) Groundwater geochemistry and Radon-222 distribution in two sites on the Reading Prong, Eastern Pennsylvania. Missouri Department of Natural Resources Special Pub., 4:147-156.
- WHO (World Health Organization) (1972) Protection against ionizing radiations: a survey of current world legislation. Geneva, 328 p.
- ZERESKI, A. (1983) The solution of Rn-222 by groundwater. PhD Thesis, University of Bath, U.K., 244 p.