

Monitoramento da radioatividade alfa relacionada ao radônio-222 em águas de poços da região metropolitana de Curitiba (PR)

Alpha radioactivity monitoring related to radon-222 in water from wells in metropolitan area of Curitiba (PR), Brazil

Janine Nicolosi Corrêa¹, Sergei Anatolyevich Paschuk¹, Jaqueline Kappke¹, Valeriy Denyak², Hugo Reuters Schelin², Flávia Del Claro¹, Allan Felipe Nunes Perna¹, Marilson Reque¹, Zildete Rocha³, Talita Oliveira Santos³

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os níveis de concentração de radônio ²²²Rn em águas de poços da região metropolitana de Curitiba, Paraná. O trabalho apresenta os resultados das concentrações das medidas feitas em águas de poços da região. As concentrações de ²²²Rn nas amostras das águas de poços foram medidas por meio do monitor de radônio AlphaGUARD. Os cálculos das concentrações de atividade iniciais de radônio na água foram feitos a partir da curva de decaimento do ²²²Rn e do equilíbrio secular entre o ²²²Rn e o ²²⁶Ra, observados depois de 30 dias. Os resultados indicaram que cerca de 70% dos valores das concentrações de ²²²Rn ficaram acima do valor recomendado pela USEPA, de 11,1 Bq.L⁻¹, representando risco radiológico causado por este radionuclídeo. O estudo de caso apresentado mostrou que medidas prévias de radônio são recomendadas para que um projeto de construção seja implementado. No caso em questão, observa-se que as concentrações de radônio diminuem cerca de 56% na primeira caixa d'água e 83% na segunda em relação ao poço. Esse fato mostra que as ações para mitigação de radônio são viáveis e não exigem grandes modificações nos sistemas usuais da construção civil.

Palavras-chave: radônio; ²²²Rn; águas de poços; radionuclídeo; mitigação; construção civil.

ABSTRACT

This research objective was to assess the level of radon-222 concentration in well water of the metropolitan region of Curitiba, Paraná. Current work presents the results of indoor ²²²Rn activity ground water samples from artesian wells from aquifers of the region. The studies of radon activity in water were performed using the radon detector AlphaGUARD. The calculations of initial radon activity in water were done considering the ²²²Rn decay correction as well as equilibrium level of ²²²Rn and ²²⁶Ra observed after 30 days of measurements. Obtained results show that about 70% of measured activity levels of ²²²Rn are higher than the recommended value of 11.1 Bq.L⁻¹, which represent the risk for the human health associated with this radionuclide. The case study showed that previous measurements of radon are recommended for a construction project is implemented. In this case, it is observed that the radon concentrations decrease about 56% in the first water tank and 83% in the second water tank over the well. This fact shows that the actions for mitigation of radon are viable and do not require major modifications to the usual systems of construction.

Keywords: radon; ²²²Rn; well water; radionuclide; mitigation; civil construction.

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Curitiba (PR), Brasil.

²Instituto de Pesquisa Pelé Pequeno Príncipe (IPPPP) - Curitiba (PR), Brasil.

³Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) - Belo Horizonte (MG), Brasil.

Endereço para correspondência: Janine Nicolosi Corrêa - Rua Lamenha Lins, 1110, apto 12A - 80250-020 - Curitiba (PR), Brasil - E-mail: janine_nicolosi@hotmail.com

Recebido: 03/10/13 - **Aceito:** 15/10/14 - **Reg. ABES:** 124599

INTRODUÇÃO

O radônio ^{222}Rn é um gás radioativo, da série radioativa natural do urânio ^{238}U , proveniente do decaimento do rádio ^{226}Ra , e, ao ser inalado, passa a ser um causador potencial do câncer de pulmão. Por ser um gás, o radônio produzido no interior das rochas e dos solos difunde-se com facilidade através de fissuras nas rochas, da porosidade do solo e de lençóis freáticos até alcançar a superfície terrestre. A meia-vida do ^{222}Rn é de 3,8 dias, portanto uma parte considerável do gás produzido chega à atmosfera (ICRP, 1991; UNSCEAR, 2000).

Dados apresentados pelo ICRP 60 (1991) e pela UNSCEAR (2000), ilustrados na Figura 1, mostram que, em média, metade de toda radiação absorvida por um ser humano, incluindo as naturais e artificiais, é devida ao radônio.

Altas concentrações de radônio podem ocorrer em ambientes (*indoor*), principalmente em construções situadas em locais onde há alta taxa de exalação do gás do solo, representando risco potencial aos indivíduos que residem ou frequentam esses locais (EISENBUD & GESELL, 1997).

O radônio contido em água e exalado dos materiais de construção pode contribuir para a concentração no interior de uma construção, porém, em geral, essa concentração é considerada pequena quando comparada com a quantidade do gás proveniente do solo sobre o qual

a edificação foi construída. No entanto, altas concentrações de radônio na água podem levar a altas concentrações no ar, dependendo dos fatores que afetam a difusão do gás no ambiente (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001).

No caso da concentração em água, diferentemente da concentração no ar, não existe uma correlação direta entre a concentração e o risco, já que muitos outros fatores, como temperatura, modo e estágios de utilização da água influenciarão particularmente na difusão do radônio contido na água e, conseqüentemente, na sua influência na concentração no ambiente (EISENBUD & GESELL, 1997).

Tendo em vista o crescente interesse dos organismos internacionais e nacionais em conhecer os níveis de radônio no ar, em águas, principalmente em poços, e a escassez desses dados em esfera nacional, o grupo de pesquisa em radiações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), em colaboração com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e com o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), tem mantido uma parceria em que se realizam medidas de radônio no ar, no solo e na água.

Essas medidas têm sido feitas pelo grupo desde 2003, e o laboratório especializou-se em medidas de radônio no ar, por meio de detectores do estado sólido do tipo CR-39, e em solo e água, por meio de equipamento eletrônico de medidas instantâneas AlphaGUARD.

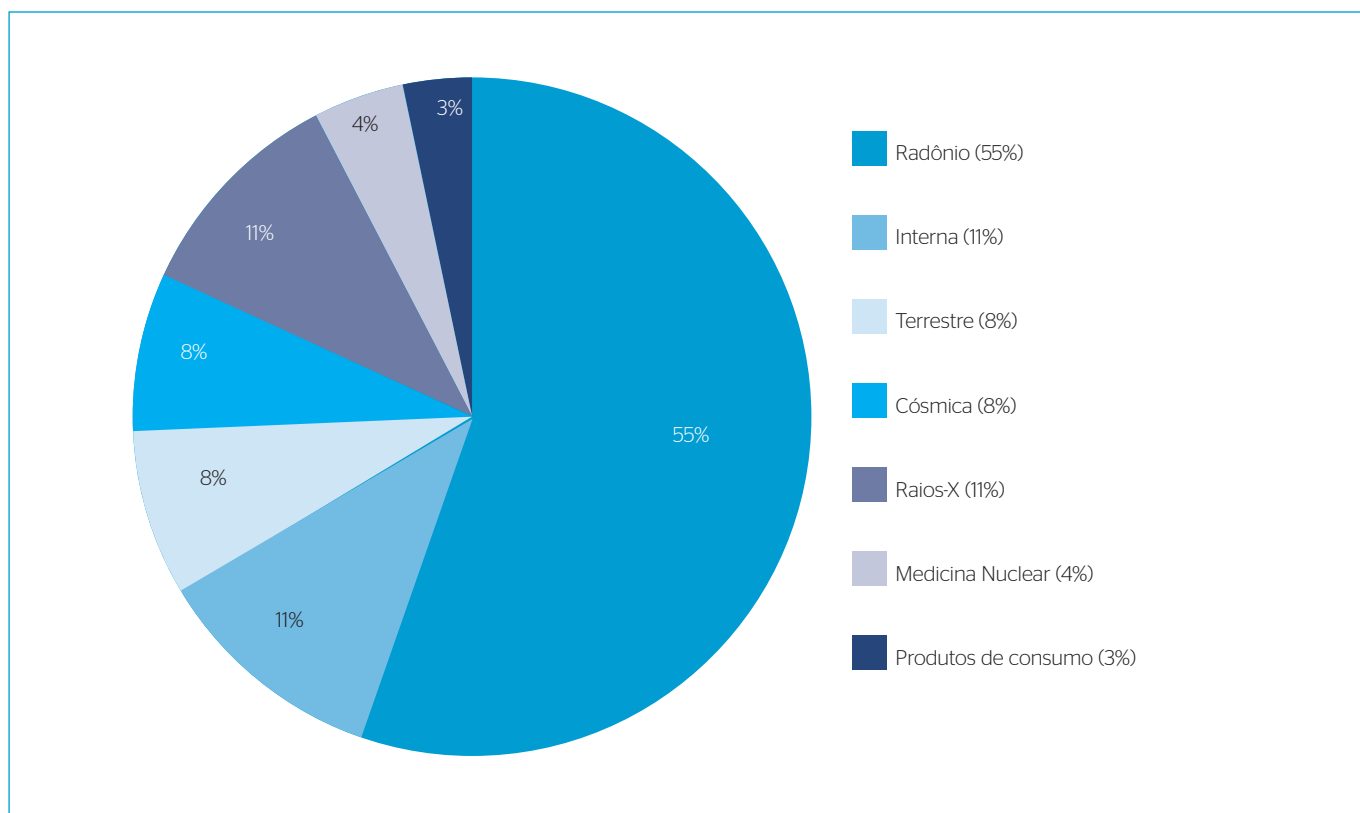


Figura 1 - Distribuição da contribuição das fontes de radiação para a dose média anual. (Adaptado de UNSCEAR, 2000)

A relação direta entre concentrações de radônio em ambientes e o desenvolvimento de câncer de pulmão é fato consolidado e amplamente divulgado pelos órgãos internacionais relacionados à saúde pública, às radiações ionizantes e à física nuclear. É divulgado de forma ampla que o radônio e filhos são a segunda causa de câncer de pulmão, e a principal causa é o cigarro. Trabalhos científicos mostram que essas duas causas associadas levam a um risco maior (ICRP 60, 1991; ICRP 65, 1993; UNSCEAR, 2000; WHO, 2009).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os níveis de concentração de radônio ^{222}Rn em águas de poços na região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná, e fazer estudo de caso com medidas preventivas e mitigadoras específicas.

METODOLOGIA

O radônio e seus filhos de meia-vida curta são os principais contribuidores para a exposição humana às radiações naturais. A UNSCEAR, por meio de seus documentos emitidos em 1993 e 2000, afirma que é bem conhecido que a inalação dos produtos de decaimento do ^{222}Rn , e em menor extensão dos produtos de decaimento do ^{220}Rn , e sua subsequente deposição ao longo das paredes de vários condutos dos brônquios são o principal caminho para a exposição à radiação nos pulmões. O isótopo ^{222}Rn , de meia-vida aproximada de 3,82 dias, tem uma oportunidade maior do que os isótopos de meia-vida curta de escapar à atmosfera.

O ^{222}Rn dissolvido na água é uma fonte de exposição humana, principalmente porque o gás é liberado da água de torneira e chuveiros, e incorporado à atmosfera do ambiente interno (NAZAROFF *et al.*, 1987).

O substrato do Paraná, mais especificamente da região metropolitana, contém rochas que na maioria são classificadas como metamórficas. Na região há grande variedade de rochas ígneas intrusivas, inclusive granitos e granitoides (MINEROPAR, 2005). Esse fato leva a se inferir que o embasamento rochoso do Paraná tenha contribuição considerável nas concentrações de radônio das águas subterrâneas da região, já que os granitos têm em sua formação os precursores desse gás.

Pesquisas da EPA (2000) sobre a concentração de ^{222}Rn em amostras de água subterrânea de rochas sedimentares mostram concentrações baixas em geral. Por outro lado, estudos de águas apresentados no mesmo documento, sobre pequenas comunidades situadas sobre o mesmo tipo de substrato, mostraram níveis de ^{222}Rn bastante elevados. Tal fato evidencia a importância das investigações, já que nas comunidades menores pode ser que a água dos poços percorra caminho mais curto e chegue mais rapidamente ao consumo.

Com relação aos níveis de concentração de radônio em água, estudos mostrados no documento sobre recomendações da comissão europeia (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001) afirmam que, em geral, a concentração em águas de superfície fica abaixo de 1 Bq.L^{-1} . O mesmo documento diz que para águas em aquíferos de rochas sedimentares os

valores ficam entre 1 e 50 Bq.L^{-1} , para poços escavados entre 10 e 300 Bq.L^{-1} e para águas advindas de rochas cristalinas entre 100 e 50.000 Bq.L^{-1} .

Os limites propostos pela EPA (2000) são de $11,1 \text{ Bq.L}^{-1}$ para o ^{222}Rn em água potável. Esse limite está relacionado à contribuição provável das águas para os ambientes.

Curiosamente diferente da EPA, a recomendação da comissão europeia (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001) é de 100 Bq/L , tendo como valor limite para intervenção 1.000 Bq/L , considerando que o radônio contido nesta água é ingerido e também inalado (liberado no ambiente). Esse valor está relacionado a uma limitação *indoor* de 200 Bq.m^{-3} .

As medidas feitas na parte experimental foram restritas à Região Metropolitana de Curitiba, com medidas em águas subterrâneas (de poços) dessa região, durante o período de dois anos — 2008 a 2010 (CORRÊA, 2011). As análises foram feitas pelo grupo de pesquisa em radiações da UTFPR, com colaboração de pesquisadores do CDTN-CNEN e do IRD-CNEN.

Para medir as concentrações de radônio e de rádio em águas de poços da região de Curitiba, foram feitas coletas de amostras dos poços e coleta de dados por meio de detector de medidas instantâneas - AlphaGUARD *portable radon monitor* (SAPHYMO).

O equipamento AlphaGUARD é um aparelho portátil e compacto para medidas contínuas de concentração de radônio. O equipamento mede radônio e filhos sem diferenciá-los. A Figura 2 mostra um esquema do circuito AlphaGUARD para medidas de radônio em água.

As medidas de radônio em água são feitas indiretamente, ou seja, tanto para medidas em ambientes (ar) e medidas em água o equipamento mede o radônio do ar do sistema. Portanto, para medidas de

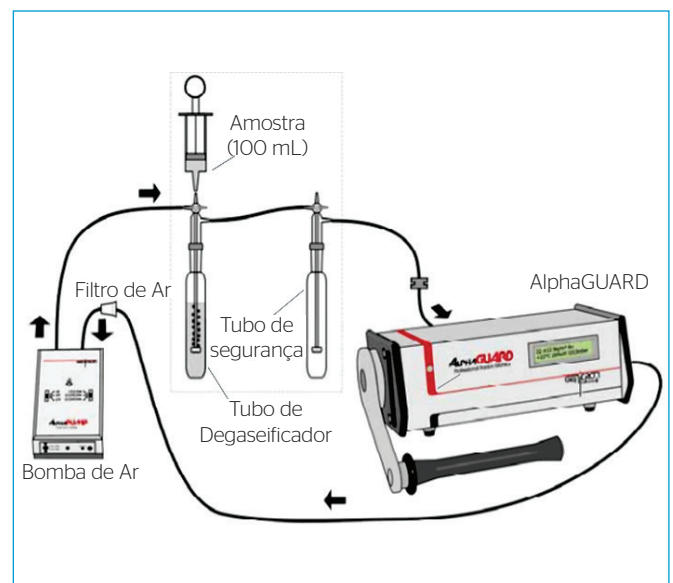


Figura 2 - Esquema do circuito do AlphaGUARD para medidas de radônio em água.

água, há que se liberar o gás da amostra para o ar de um sistema fechado por meio de um tubo degaseificador.

As amostras de água foram retiradas dos poços cerca de 1,5 m abaixo da lâmina de água; assim, a água de superfície foi rejeitada, e o volume coletado foi de cerca de 1 L, suficiente para medidas posteriores de 100 mL cada. Para realizar a coleta de amostras de água, foram necessários equipamentos simples, como: garrafas com tampas, barbante e um peso metálico acoplado. As amostras foram levadas o mais rápido possível para o Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde ocorreram as medições.

Cada medida foi feita por cerca de 60 minutos. Foram feitas medidas com intervalos de tempos de alguns dias e, ao final de 2 meses ou mais, uma última medida foi feita. Posteriormente, os dados foram transferidos do aparelho ao computador para análises.

Os níveis detectados foram calculados levando em conta o volume de água da amostra, a temperatura, a pressão atmosférica (cujo efeito é levado em consideração pelo equipamento) e o volume de ar no sistema.

Lembrando que o aparelho mede o radônio da água indiretamente, a concentração na água $C_{\text{água}}$, em Bq/L, é obtida por meio de cálculos através da Equação 1, os quais envolvem a quantidade de radônio detectada por difusão no aparelho AlphaGUARD, Car , em Bq/m³, o volume total do aparelho e o volume da amostra de água usada, o coeficiente K , que é o coeficiente de partição relacionado à temperatura ($T(^{\circ}\text{C})$), e C_{bg} , que é a concentração do sistema antes da medição, em Bq.m⁻³.

$$C_{\text{água}} = \frac{Car \left(\frac{V_{\text{sistema}} - V_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} + K \right) - C_{\text{bg}}}{1.000} \quad (1)$$

Considerando o equilíbrio secular, para casos em que a constante de decaimento λ de um elemento é muito maior que do outro, vale a expressão vista na Equação 2.

$$ARn(t) = A_{0Ra} (1 - e^{-\lambda Rn.t}) \quad (2)$$

Nesta: $ARn(t)$ é a concentração medida de ²²²Rn no tempo t e A_{0Ra} é a concentração inicial (constante) de ²²⁶Ra na amostra e λRn é a constante de decaimento do ²²²Rn.

No caso da representação da concentração de atividade para amostras de água medidas neste trabalho, deve ser levado em consideração também que no momento inicial existe concentração de radônio advindo do solo e já presente na amostra, que decai naturalmente.

Assim, a Equação 3 mostra a concentração de radônio em função da concentração inicial de ²²²Rn e ²²⁶Ra.

$$ARn(t) = A_{0Ra} (1 - e^{-\lambda Rn.t}) + A_{0Rn} (e^{-\lambda Rn.t}) \quad (3)$$

Em que: $ARn(t)$ é a concentração medida de ²²²Rn no tempo t , A_{0Ra} é a concentração inicial (constante) de ²²⁶Ra na amostra, A_{0Rn} é a concentração inicial de ²²²Rn na amostra e λRn é a constante de decaimento do ²²²Rn.

Observa-se que a primeira parcela da equação se refere à geração de ²²²Rn pelo decaimento do ²²⁶Ra na amostra, e a segunda parcela se refere ao ²²²Rn que existe na amostra em razão da difusão do gás do solo para a água.

Nesse momento, a partir da formulação deduzida apresentada, calculou-se as concentrações iniciais de ²²²Rn e ²²⁶Ra (A_{0Rn} e A_{0Ra}) a partir das medidas feitas da concentração de ²²²Rn ($ARn(t)$) em intervalos de tempos conhecidos.

É importante ressaltar que os valores de concentração de atividade de radônio plotados para a construção da curva foram acompanhados de seus erros, e na construção da curva obtiveram-se os valores das concentrações iniciais A_{0Ra} e A_{0Rn} , com seus respectivos erros, menores que os erros de cada medida isolada em razão do ajuste da curva.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As concentrações iniciais de ²²²Rn e ²²⁶Ra (A_{0Rn} e A_{0Ra}) foram calculadas a partir das medidas feitas da concentração de ²²²Rn no tempo ($ARn(t)$), da seguinte maneira:

As medidas de ²²²Rn foram feitas em intervalos de tempos, os quais foram identificados com decaimentos 1, 2,...etc. Considera-se que o radônio medido é proveniente de duas fontes: do solo para a água e do ²²⁶Ra contido na amostra.

Assim, embora não se possa identificar imediatamente qual a contribuição de cada fonte para a curva esperada, considerando-se as duas fontes em conjunto, e a partir da Equação 3, calculam-se as concentrações iniciais mencionadas.

Dessa forma, identifica-se a concentração de ²²²Rn no momento da coleta da água, e a concentração de ²²⁶Ra que pode ser considerada constante devido à meia-vida longa do elemento.

A Figura 3 exemplifica o processo de obtenção do resultado para um dos poços monitorados. Do lado esquerdo da figura, aparece o gráfico da curva de decaimento para o ²²²Rn e ²²⁶Ra. Do lado direito, aparecem as médias das concentrações obtidas nas medidas (na atmosfera do sistema AlphaGUARD) que foram convertidas de Bq.m⁻³ para Bq.L⁻¹, calculadas de acordo a Equação 1, com seus respectivos erros associados.

Do lado direito, em baixo, é mostrada a concentração inicial, calculada a partir da curva de decaimento. Foram construídos gráficos de todos os poços monitorados. Observa-se que o erro da determinação fica reduzido com o ajuste da curva. Isso proporciona um resultado interessante, já que para medidas de radônio, em geral, os erros associados às medidas individuais são grandes, às vezes maiores que as próprias medidas.

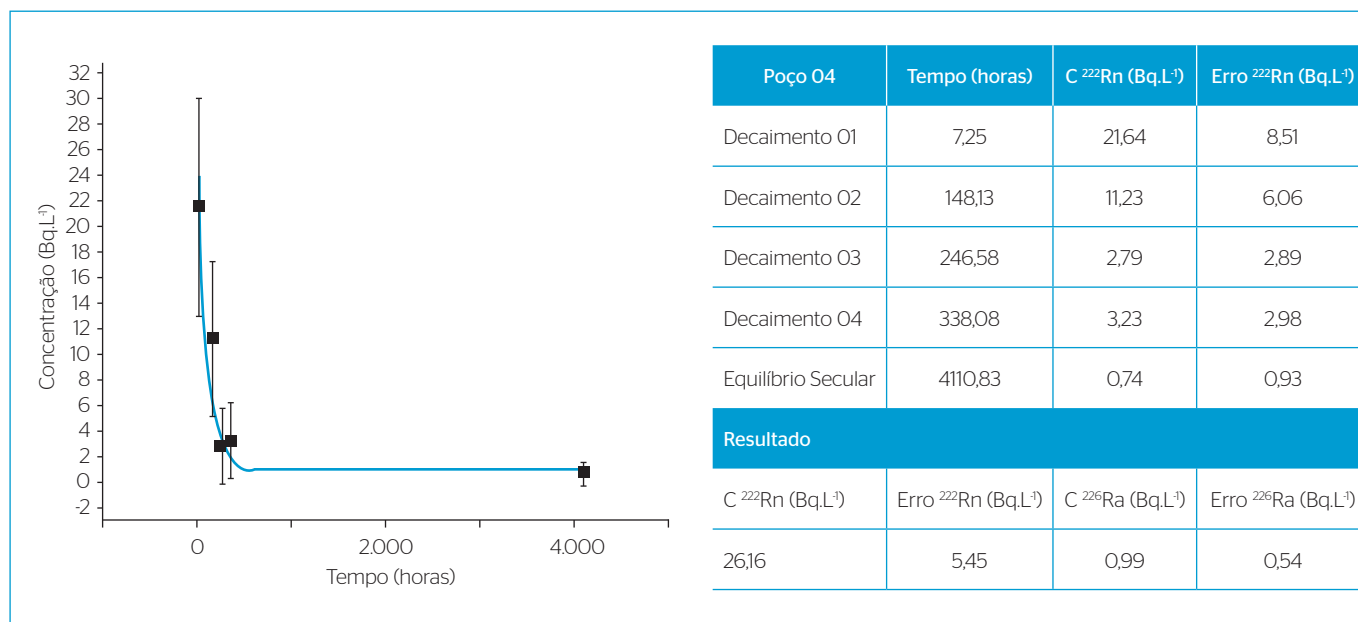


Figura 3 - Concentração de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 4.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados das medidas de radônio em água de poços. Observa-se que a metodologia usada permitiu que também se obtivesse o resultado das concentrações de rádio, além de radônio, já que a curva de decaimento foi construída para esses dois elementos.

A primeira coluna apenas relaciona a amostra ao poço investigado, a segunda coluna mostra a concentração de ²²²Rn no momento da coleta, a coluna 4 mostra a concentração de ²²⁶Ra na amostra, e as colunas 3 e 5 mostram os erros associados

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram que cerca de 70% das amostras de águas de poços investigadas ficaram acima de 11,1 Bq.L⁻¹, valor limitante proposto pela EPA (2000).

No entanto, a mesma agência sinaliza que o radônio contido na água contribui com apenas 1/10.000 de seu valor para a atmosfera do ambiente. Assim, as concentrações encontradas somente podem ser consideradas como risco à saúde se investigado o contexto do uso da água do poço em questão.

Observa-se também que a fonte de ²²²Rn na água é principalmente o solo, já que em caso algum o ²²⁶Ra foi responsável por concentração maior que 11,1 Bq.L⁻¹, sendo o máximo valor encontrado para essa contribuição de 6,76 Bq.L⁻¹ em caso isolado.

As ações mitigatórias para o uso de águas de poços são simples e não envolvem custos altos. O simples fato de não usar a água diretamente do poço e sim ter uma caixa d'água externa com tempo de descanso de alguns dias diminui a concentração de radônio. A instalação de "lavadeiras" no caminho da água também propicia a diminuição do radônio na água.

Implementação de ação mitigatória para o uso de água de poço – um estudo de caso

No ano de 2008, o Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR fez medida da água de poço de um local em Curitiba, destinado à construção de residência, com projeto que incluía o uso de água de poço.

A medida mostrou-se acima dos 11,1 Bq.L⁻¹, e, na época, o proprietário se interessou em incluir no projeto construtivo um sistema que diminuísse a concentração de radônio na água a ser usada na futura residência.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Radiações fez algumas sugestões, e a residência foi então construída fazendo-se a implementação de ação mitigatória para o uso de água do poço do terreno.

Essa ação incluiu o uso de duas caixas d'água, para aumentar o tempo de descanso da água, e principalmente a instalação de um espirador, que auxilia na saída do radônio.

Após a implementação do sistema, foram feitas medidas das concentrações de radônio na água em três locais: no poço (Figura 4), na primeira caixa d'água e na segunda caixa d'água.

A Figura 5 mostra um esquema do sistema de mitigação em residência de Curitiba.

As medidas foram feitas *in loco*, portanto não há cálculos em razão do tempo de decaimento das amostras. Os valores das concentrações de radônio encontram-se na Tabela 2.

Observa-se que para essas medidas, como não foram feitas medidas do decaimento para a construção de curva da mesma maneira que haviam sido feitas nas medidas de água apresentadas anteriormente, o erro é relativamente alto.

Tabela 1 - Resultados das concentrações de ^{222}Rn e ^{226}Ra nos poços.

	Concentração de ^{222}Rn (Bq.L ⁻¹)	Erro de ^{222}Rn (Bq.L ⁻¹)	Concentração de ^{226}Ra (Bq.L ⁻¹)	Erro de ^{226}Ra (Bq.L ⁻¹)
Poço 01	10,2	5,7	0,87	0,72
Poço 02	6,7	1,7	1,03	0,34
Poço 03	16,5	4,4	0,83	0,49
Poço 04	26,1	5,5	0,99	0,54
Poço 05	22,1	7,3	0,66	0,86
Poço 06	7,7	3,9	0,61	0,55
Poço 07	22,6	4,5	1,35	0,63
Poço 08	11,6	1,8	1,40	0,49
Poço 09	10,0	3,3	1,05	0,70
Poço 10	3,6	1,9	1,58	0,74
Poço 11	10,9	4,9	2,51	0,82
Poço 12	12,2	3,5	1,12	0,62
Poço 13	4,0	2,9	0,72	0,36
Poço 14	31,8	3,4	1,63	0,32
Poço 15	5,2	1,5	1,91	0,63
Poço 16	24,5	7,0	2,0	1,5
Poço 17	141	31	2,5	2,0
Poço 18	196	48	1,6	1,7
Poço 19	215	56	1,8	1,8
Poço 20	47	15	2,2	2,1
Poço 21	6,8	3,0	1,66	0,63
Poço 22	16	1,3	0,69	0,40
Poço 23	40	20	1,25	0,85
Poço 24	40	21	1,33	0,96
Poço 25	50	23	1,5	1,1
Poço 26	74,9	2,5	1,70	0,19
Poço 27	72	23	0,50	0,78
Poço 28	17,0	5,4	1,84	0,81
Poço 29	18,5	2,4	3,73	0,48
Poço 30	12,7	4,4	2,56	0,88
Poço 31	203	14	6,8	2,0



Figura 4 - Imagem do poço do estudo de caso.

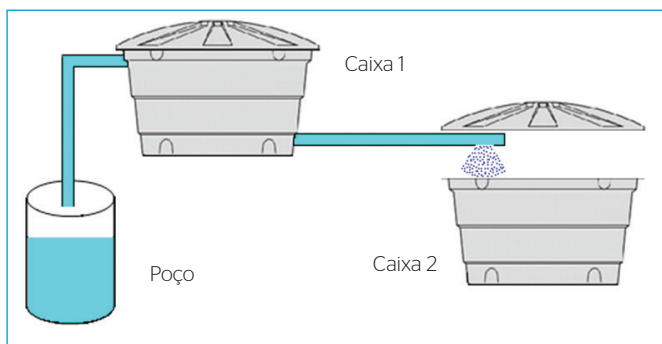


Figura 5 - Esquema do sistema de mitigação implementado em residência em Curitiba.

Tabela 2 - Concentração de radônio em três pontos do sistema de mitigação.

Concentração de ²²² Rn (Bq.L ⁻¹) no poço	Concentração de ²²² Rn (Bq.L ⁻¹) na caixa 1	Concentração de ²²² Rn (Bq.L ⁻¹) na caixa 2
37,8±9,8	16,7±5,8	6,5±3,4

No entanto, observa-se que as concentrações de radônio diminuem cerca de 56% na primeira caixa d'água e 83% na segunda caixa d'água em relação ao poço. Esse fato mostra que as ações para mitigação de radônio são viáveis e não exigem grandes modificações nos sistemas usuais da construção civil.

CONCLUSÕES

Os níveis de concentração de ²²²Rn em águas de poços da Região de Curitiba mostraram-se altos, já que cerca de 70% das amostras de águas de poços investigadas ficaram acima de 11,1 Bq.L⁻¹. Esse fato não constitui um problema por si só, já que o tipo de uso da água é determinante para a contribuição do radônio da água para a atmosfera.

No entanto, a região onde os valores de concentração na água foram expressivos coincide com o uso dessa água em caldeiras em ambientes frequentados por trabalhadores. Tal fato constitui certamente risco à saúde, já que é comprovada a influência do radônio na formação de tumores cancerígenos no pulmão.

O estudo de caso apresentado mostrou que medidas prévias de radônio são recomendadas para que um projeto de construção seja implementado. No caso em questão, o conhecimento prévio da concentração de radônio (alta) no poço propiciou a inclusão de um sistema de mitigação, que implementado mostrou resultados positivos.

Esse fato corrobora a necessidade de medidas de radônio no Brasil, que, se considerado o tamanho do país, ainda encontram-se em pequeno número. Todavia, observa-se um grande interesse sobre o assunto e o aumento no número de medidas e pesquisas sobre radônio nos últimos anos.

REFERÊNCIAS

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. (1998) *NE 3.01. Diretrizes básicas de radioproteção*. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>>. Acesso em: jan. 2010.

COMMISSION RECOMMENDATION of the Protection of the Public Against Exposure to Radon in Drinking Water Supplies. (2001) *Journal of the European Communities*. Document number 4589, 2001.

CORRÊA, J.N. (2011) *Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná*. 103 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

EISENBUD, M. & GESELL, T. (1997) *Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources*. 4 ed. California, USA: Academic Press.

EPA - Environmental Protection Agency. (2000) *National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule*. v. 65, n. 236, Washington, DC.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. (1991) *ICRP 60 - Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Oxford: Pergamon Press, v. 2, n. 1-3.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. (1993). *ICRP 65 - Protection Against Radon-222 at Home and at Work*. Oxford: Pergamon Press, v. 23, n. 2.

MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. *Panorama da produção mineral paranaense*. (2005) 1995-2001: sumário executivo. Curitiba: Mineropar.

NAZAROFF, W.W.; DOYLE, S.M.; NERO, A.V.; SEXTRO, R.G. (1987) Potable water as a source of airborne Rn-222 in U.S. dwellings: A review and assessment. *Health Physics*, v. 52, p. 281-295.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1993) *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, anexo A. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, anexo I. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

WHO - World Health Organization. (2009) *Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective*. Switzerland: WHO Press.