

# Informe Técnico-Científico de Prevenção de Desastres e Ordenamento Territorial

Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial | Departamento de Gestão Territorial

V. 2, N. 1 Rio de Janeiro, março 2021

## A Qualidade da Água Subterrânea com Ênfase na Toxicidade dos Radionuclídeos na Região da Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia, Brasil

*Groundwater quality with emphasis in radionuclide toxicity in the Uraniferous Province of Lagoa Real, Bahia State, Brazil*

Aline da Costa Nogueira ([aline.nogueira@cprm.gov.br](mailto:aline.nogueira@cprm.gov.br))<sup>1</sup><sup>1</sup> Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Superintendência de Salvador

### Abstract

Chemical elements, even if they occur naturally in the environment, can produce adverse health effects when ingested in high concentrations. The area is located in the Uraniferous Province of Lagoa Real, important uranium mineralizations occur, and for this reason, water containing this element and its daughter nuclides are expected. During the field stage in Caetité and Lagoa Real municipalities, 22 groundwater wells were sampled. For the uranium results, the wells represented by acronyms AC-14 has a concentration of 96  $\mu\text{L}$  and the maximum value allowed by legislation is 30  $\mu\text{L}$ . For radio-226, the AC-10 sample was measured 1.03 Bq/L, exceeds the limit established by law for water potability. For radio-228, mean concentrations of 0.91 Bq/L, and the maximum value detected in the sample AC-08 with 2.92Bq/L, being above the limit in all wells sampled. And finally, for radon, as an average concentration of 184.5 kBq/m<sup>3</sup> is above that recommended by the World Health Organization, being the well AC-08 with values higher than the RAD-07 meter that is 1187.2 kBq/m<sup>3</sup>. The radionuclides studied are potentially harmful to human health, mainly because they are carcinogenic.

**Keywords:** Groundwater, Radioisotopes, Radon, Toxicity

**Palavras chave:** Água subterrânea, Isótopos de Rádio, Radônio, Toxicidade.

### INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas denotam variadas características físico-químicas que são associadas às condições de dissolução das rochas e de circulação em subsuperfície. No substrato geológico podem ocorrer rochas com minerais radioativos em sua composição e, em contato com a água subterrânea, são mobilizados e podem contaminar aquíferos com radionuclídeos, ou seja, nuclídeos que emitem radiação.

Com o contínuo uso da água proveniente do substrato como fonte de abastecimento para suprir as necessidades humanas, são imprescindíveis as pesquisas que informem tanto a quantidade como a qualidade destas águas para consumo. Em vias gerais, o objetivo desta pesquisa é a avaliação da qualidade das águas subterrâneas através da análise dos elementos urânio, rádio e radônio em uma área inserida na Província Uranífera de Lagoa Real. Estes elementos são potencialmente prejudiciais à saúde

humana e, ao entrar em contato com o organismo através da ingestão de água contaminada, podem desenvolver alguns tipos de câncer devido às formas absorção e toxicidades relacionadas.

### ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

A área está localizada no centro-sul do Estado da Bahia, nos municípios de Lagoa Real e Caetité. O Complexo Lagoa Real situa-se na porção mais a norte do Orógeno Araçuaí, cujos limites foram recentemente redefinidos baseados nos trabalhos de Cruz *et al.* (2007). Este local é marcado por um conjunto de zonas de cisalhamento a partir da interação entre duas unidades tectônicas: o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí (Figura 1). O seu substrato é constituído por gnaisses, migmatitos e sequências vulcanosedimentares de idade arqueana-paleoproterozoica (BASTOS-LEAL *et al.*, 1997). Costa *et al.* (1985) elucidam ainda que o embasamento

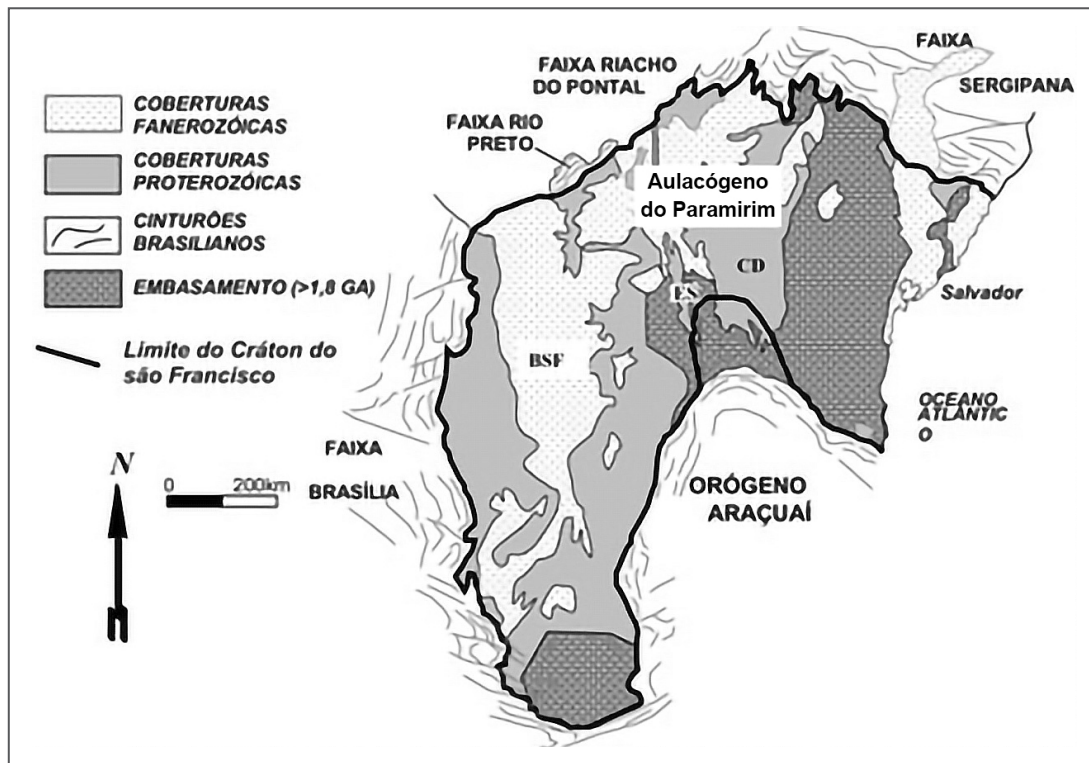


FIGURA 1 - Compartimentos geológicos regionais e suas interações. Fonte: modificado de Cruz *et al.* (2007).

referido como Complexo Metamórfico-Migmatítico, é composto por granodioritos e tonalitos sendo estes predominantes em relação a dioritos e granitos.

A exploração de águas subterrâneas na região está associada a sistemas de fraturamentos formados a partir de múltiplas fases de deformação superimpostas nas rochas durante a evolução do Aulacógeno Paramirim, no Neoproterozoico (CRUZ *et al.*, 2007). As estruturas tectônicas regionais também estão associadas a processos deformacionais dúcteis que produziram zonas de cisalhamento e sistemas de falhamentos regionais, que em profundidade facilitam a mobilidade e fluxo dos radioisótopos através da interação da água com minerais radioativos presentes nas rochas da região.

## METODOLOGIA

A etapa de campo ocorreu durante a estação seca, onde foram definidos 22 pontos de coleta, baseada nos poços de água subterrânea implantados pela prefeitura local e por particulares (Figura 2). Os parâmetros físico-químicos como temperatura, salinidade, condutividade, pH, oxigênio dissolvido (OD) e sólidos totais dissolvidos (STD) foram analisados *in situ* através da sonda multiparâmetros *Horiba U52-G*. As amostras que seguiram para análise laboratorial foram filtradas e acondicionadas em frascos específicos para obter resultados fidedignos. Para análise dos cátions foram adicionadas duas gotas de ácido clorídrico, com a finalidade de preservação

destes elementos. Para resultados dos isótopos instáveis  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  foi utilizada espectrometria gama com detector HPGe (*High Purity Germanium Detector*). Para determinação do  $^{222}\text{Rn}$  foi utilizado o equipamento Rad-7 da *Durridge Inc*, que realizou as leituras durante a etapa de campo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises dos parâmetros físico-químicos foram realizadas durante o período da coleta. Para condutividade elétrica apresentam valores médios de 1094,59  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mediana de 967,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo a maior medida no poço AC-20 com 3340,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para STD os valores de média e mediana são respectivamente 701,36 e 620,00 mg/L. No poço AC-20 foi detectado o valor máximo de 2140,00 mg/L. O pH é classificado como neutro pois marca, em média, 7,07 até no máximo de 7,68. O parâmetro turbidez tem sua mediana marcando 0,0 NTU, já que em mais de 85% dos poços o valor medido foi zero. No entanto, no poço AC-14 foi medido o valor de 37,60 NTU. E por fim, para o OD os valores são, em média, 5,37 mg/L e sua mediana 5,13 mg/L. No poço AC-14 foi medido o valor máximo de 11,46 mg/L, sendo esse valor anômalo explicado pelo bombeamento do poço durante a amostragem. Em relação ao padrão de potabilidade das águas subterrâneas, pela Portaria da Consolidação nº 5 de 28 de setembro do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), indica que para STD o valor máximo permitido é

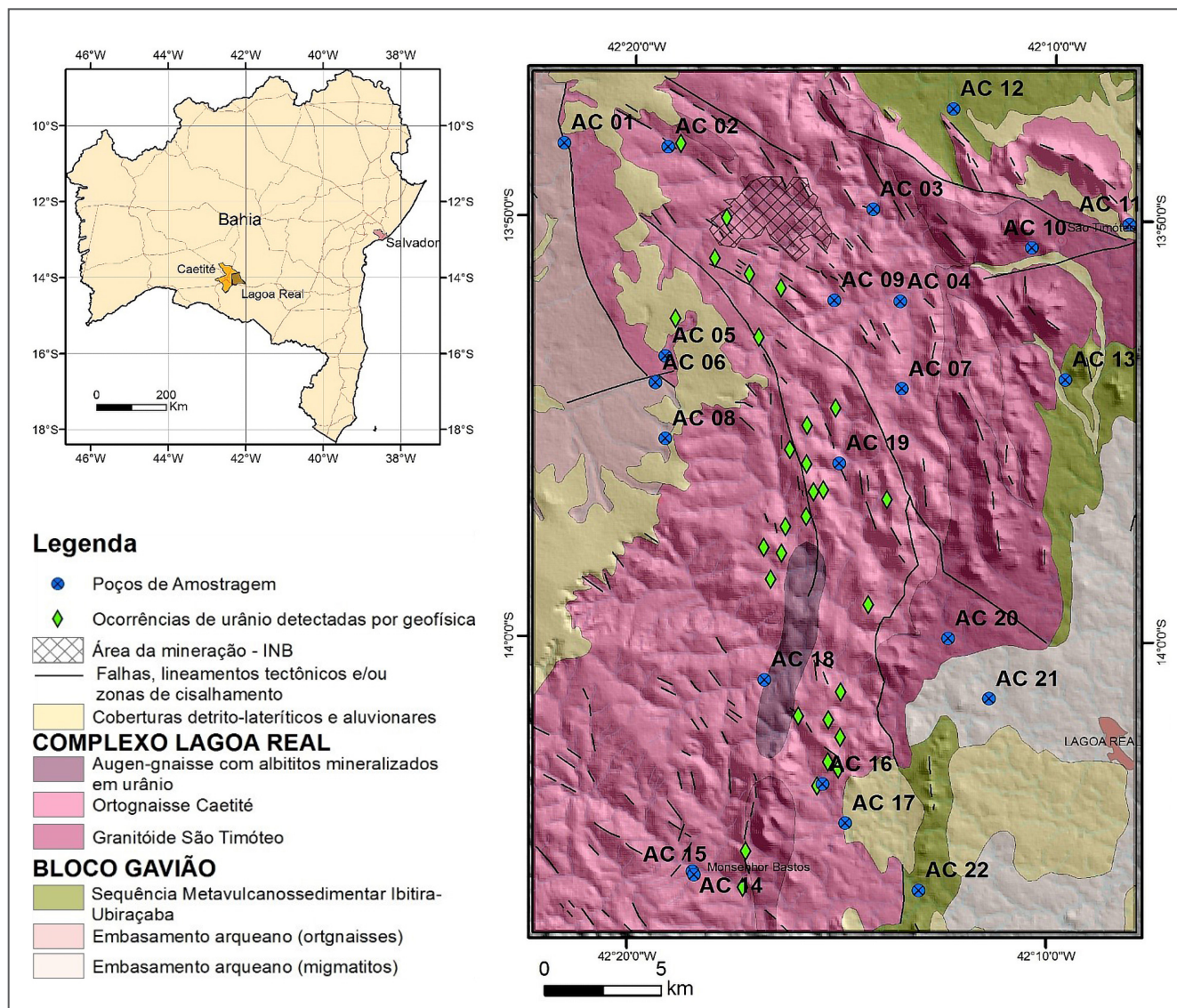


FIGURA 2 - Mapa Geológico da área com indicação dos poços amostrados e as anomalias de urânio. Fonte: SOUZA *et al.* (2003).

de 1000 mg/L e é ultrapassado nos poços AC-11, AC-15, AC-20, AC-21 e AC-22 e para Turbidez o VMP é de 5 UT, sendo acima do limite no poço AC-04 e AC-14. Na tabela 1 encontram-se os valores dos parâmetros físico-químicos com os resultados dos radionuclídeos.

### Toxicidade dos elementos químicos urânio, rádio e radônio.

#### Urânio

O comportamento geoquímico do urânio na água subterrânea vai depender de alguns fatores que afetam a sua distribuição em águas naturais, sendo eles: teor de urânio na rocha matriz, tempo de residência do urânio no ambiente, variação climática, pH e presença de matéria orgânica (BONOTTO; SILVEIRA, 2006). O urânio ocorre na natureza, em maior constância, nos estados de valência de 4+ e 6+, e a presença da matéria

orgânica produz uma relação importante nas reações de adsorção de urânio. Em condições oxidantes  $U^{6+}$  forma o íon uranila ( $UO_2^{2+}$ ) que é altamente solúvel e forma complexos estáveis com os ânions comuns dissolvidos em águas subterrâneas. Em condições ácidas, os principais complexos de uranila são formados com o fosfato e em condições alcalinas são formados com os carbonatos.

Pela Resolução do CONAMA nº 396 de 2008 (BRASIL, 2008), o limite em água subterrânea é de 0,015 mg/L ou 15  $\mu$ /L e pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011 (BRASIL, 2011) e pelo WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2017) é 0,03 mg/L ou 30  $\mu$ /L. Como estes expressam os valores mais recentes na comunidade científica, foi adotado como limítrofe para as amostras analisadas.

Na área foi detectado um poço acima do limite da legislação que corresponde aos pontos AC-14. Neste foi medido o valor de 96  $\mu$ /L e está instalado na comunidade

TABELA 1: Resultados das análises dos parâmetros físico-químicos e dos radionuclídeos.

Amostras	Latitude	Longitude	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	Turbidez (NTU)	STD (mg/L)	OD (mg/L)	U * ( $\mu\text{g/L}$ )	$^{222}\text{Rn}$ (kBq/m <sup>3</sup> )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)
AC - 01	784848	8472425	744	6,90	0,0	480	6,90	< 10	389,2	0,71	0,86
AC - 02	789857	8472417	667	6,90	0,0	430	5,17	< 10	222,6	0,44	1,01
AC - 03	798621	8469357	1430	6,88	0,0	910	4,11	< 10	140,7	0,28	0,94
AC - 04	799883	8464984	611	7,26	9,7	390	7,60	< 10	64,7	0,70	0,59
AC - 05	789697	8463159	314	6,30	0,0	200	5,08	< 10	162,0	0,45	0,77
AC - 06	789175	8461853	76	6,20	0,0	50	6,10	< 10	111,6	0,27	1,04
AC - 07	799817	8461784	446	6,90	0,0	290	3,10	< 10	32,1	0,60	0,32
AC - 08	788684	8458925	173	6,56	0,0	110	4,00	< 10	1187,2	0,96	2,92
AC - 09	796882	8465417	805	7,50	0,0	520	5,50	12	90,5	0,43	0,71
AC - 10	805589	8467366	1090	7,13	0,0	700	3,67	< 10	91,1	1,03	2,46
AC - 11	810566	8468617	1870	7,68	0,0	1190	7,56	< 10	57,4	0,18	0,21
AC - 12	801598	8474322	1240	7,20	0,0	800	5,26	< 10	62,7	0,27	0,83
AC - 13	806910	8464348	233	6,80	0,0	150	4,16	< 10	101,5	0,76	0,89
AC - 14	790926	8440291	1330	7,39	37,6	850	11,46	96	213,2	0,81	0,58
AC - 15	790966	8440209	1950	7,15	0,0	1250	4,41	< 10	105,4	0,39	0,61
AC - 16	796185	8444126	1070	7,18	0,0	680	5,36	< 10	103,3	0,74	0,78
AC - 17	797286	8442460	939	7,45	0,0	600	4,95	< 10	83,9	0,47	0,58
AC - 18	793853	8448800	768	7,12	0,0	490	7,84	< 10	108,6	0,23	0,54
AC - 19	797032	8457726	995	6,99	3,1	640	6,15	< 10	85,0	0,48	1,62
AC - 20	801728	8450628	3340	7,33	0,0	2140	4,15	< 10	239,6	0,46	0,69
AC - 21	803443	8448002	1870	7,54	0,0	1200	3,63	29	222,1	0,49	0,38
AC - 22	802250	8439352	2120	7,09	0,0	1360	1,96	11	185,2	0,38	0,59

(\*U) apresenta valores abaixo do limite de detecção do laboratório, que é 10  $\mu\text{g/L}$ .

Fonte: Elaborada pela autora.

de Monsenhor Bastos no município de Lagoa Real, e atende a população com água para serviços domésticos. O poço AC-21, na localidade de Canabrava do mesmo município, foi detectado o valor de 29  $\mu\text{g/L}$ , ou seja, aproximado do limite aceitável. É um poço em área particular, que atendia uma pequena plantação e estava lacrado durante a última visita de campo, em razão de medidas realizadas pela prefeitura que constatou altos teores de urânio.

Segundo Silva (2011), a absorção do urânio a partir do trato gastrointestinal depende de fatores como a solubilidade do composto deste elemento. Os rins são considerados o principal órgão alvo da toxicidade química do urânio em seres humanos, sendo o esqueleto o principal local de acumulação dentro do organismo. Num estudo realizado por Kurttio *et al.* (2005) foi comprovado que a ingestão do urânio através da água pode alterar de forma significativa alguns indicadores bioquímicos de modelação óssea em seres humanos, o que caracteriza

a toxicidade do urânio no osso. Este elemento é liberado da superfície óssea de forma mais lenta que o cálcio. O acúmulo de urânio no osso é reflexo de uma exposição em longo prazo, enquanto que na urina reflete exposição recente. Destaca-se também o estudo de Prado (2007), onde foram analisados dentes humanos como bioindicadores da contaminação através da ingestão da água contaminada, possuindo concentrações de U cerca de 100 vezes a concentração média mundial. Já existem alguns métodos que podem ser aplicados com a finalidade de remover grande parte do urânio da água como a filtração (ou coagulação), osmose reversa e troca aniônica que pode chegar a remover 100% do urânio da água (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011).

#### Rádio

As concentrações naturais de rádio em águas subterâneas estão relacionadas ao tipo de rocha do aquífero, condições físico-químicas do meio e tempo de contato

(BONOTTO; SILVEIRA, 2006). Quimicamente esses radioisótopos reagem de forma semelhante a outros cátions alcalino-terrosos tais como cálcio e estrôncio e é mais semelhante a bário. A solubilidade do elemento não varia entre os isótopos, sendo controlada pela adsorção superficial, bem como reações de dissolução e precipitação. Segundo Vinson *et al.* (2009) a mobilidade do rádio ou a eficácia da adsorção podem variar em função dos parâmetros químicos incluindo o pH, salinidade, ambientes redutores, supersaturação de barita, redução microbiana de sulfato afetando a estabilidade da barita e redução de óxido de ferro microbiano. Também ocorre uma forte afinidade por partículas sólidas, como argilas e óxidos hidratados. Os óxidos hidratados de  $Fe^{3+}$  e  $Mn^{4+}$  possuem alta capacidade de sorção para íons de metal bivalente (HANSLIK; MANSFELD, 1990).

Na área apresenta, em média, a concentração de 0,52 Bq/L e mediana de 0,47 para  $^{226}Ra$ . Esse valor é abaixo do limite estabelecido para consumo, porém o valor máximo é de 1,03 Bq/L no poço AC-10, sendo este o único poço que ultrapassa esse limite. Já para o isótopo  $^{228}Ra$ , com o valor médio de 0,91 Bq/L e mediana de 0,74 Bq/L, estão acima do limite de potabilidade em todos os poços amostrados; o valor máximo de 2,92 Bq/L foi obtido no poço AC-08. A Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade estabelecem como níveis de triagem os valores máximos de referência de 1 Bq/L para  $^{226}Ra$  e 0,1 Bq/L para  $^{228}Ra$ .

Fazendo uma relação entre os dois isótopos, observa-se que o  $^{228}Ra$  possui teores maiores na área como um todo. Isto ocorre porque, em geral, o tório é mais abundante na crosta terrestre do que o elemento urânio, sendo que a média crustal para o Th: 10 ppm e para o U: 2 a 3 ppm (PLANT *et al.*, 2012). Nos poços AC-04, AC-07, AC-14 e AC-21 há um enriquecimento relativo do  $^{226}Ra$  em relação ao  $^{228}Ra$ .

O rádio, que possui comportamento análogo ao cálcio no organismo, fixa-se nos ossos, e assim podem desenvolver processos carcinogênicos. Segundo Lima (1996), estes ao serem ingeridos em altas concentrações poderão causar um aumento significativo nos casos de câncer de bexiga, pulmão e tórax.

### Radônio

O radônio dissolvido nas águas subterrâneas pode migrar por longas distâncias através de fraturas e cavernas dependendo da velocidade do fluxo da água subterrânea. Dados de uma pesquisa internacional (UNITED NATION SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC, 2000) concluíram que, em média, 90% da dose que se atribui ao radônio na água potável é

proveniente de inalação, em vez de ingestão. Este elemento dissolvido na água pode ser liberado ao ar quando são utilizados em atividades associadas com a água aquecida ou agitada, chuveiros e descargas no banheiro. A agência americana USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999) utiliza como limite para potabilidade de água, 300 pCi/L, ou seja, 11,1 Bq/L de radônio dissolvido. A Organização Mundial da Saúde recomenda um nível de referência para 100 kBq/m<sup>3</sup> ou 100 Bq/L (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009).

Na área foi detectada uma grande amplitude de resultados. A concentração em média é de 184,5 Bq/L e mediana de 107 Bq/L. No poço AC-07 foi medido 32,1 Bq/L, que é o menor valor encontrado, enquanto que no AC-08 tem o alto valor de 1187,2 Bq/L. Esses valores já ultrapassam os valores utilizados pela Organização Mundial da Saúde para potabilidade de água. O radônio está mais concentrado nos poços situados onde assinatura de tório é maior, contribuindo também à proximidade das zonas tectonizadas principais, como falhas e fraturas regionais. É o caso do ponto AC-08, que está situado nas imediações da falha que separa duas unidades litológicas importantes: o embasamento arqueano e o Complexo Lagoa Real de idade paleoproterozoica. O  $^{222}Rn$  não forma compostos químicos e ao ser formado no retículo cristalino é facilmente removido e mobilizado por difusão através da emanção, fazendo com que os teores de  $^{222}Rn$  sejam muito maiores que o nuclídeo-pai,  $^{226}Ra$ .

Há estudos divulgados que o radônio e seus filhos são a segunda causa de câncer de pulmão. Segundo Corrêa *et al.* (2015) o  $^{222}Rn$  dissolvido na água é uma fonte de exposição humana, principalmente quando o gás é liberado no interior das residências, e incorporado no corpo humano através das vias respiratórias.

Na figura 3 foi confeccionado um gráfico que demonstra a concentração dos radionuclídeos com relação aos limites para consumo humano. Os teores dos isótopos de rádio foram somados para ficar mais evidente a relação do elemento rádio com o radônio. Com isso, pode ser notado que o padrão de concentração do radônio é acompanhado pelos isótopos de rádio. O ponto AC-08 perfaz a maior concentração dos radionuclídeos, em virtude de estar localizado nas imediações da falha que limita o embasamento arqueano com o Complexo Lagoa Real, onde pode ter ocorrido uma maior interferência de fluidos que dão origem a mineralização, além de estar numa área de movimentação tectônica, no qual imprime suas características na água subterrânea local. É importante salientar que para o parâmetro  $^{226}Ra$  todos os poços estão acima do limite para consumo humano.

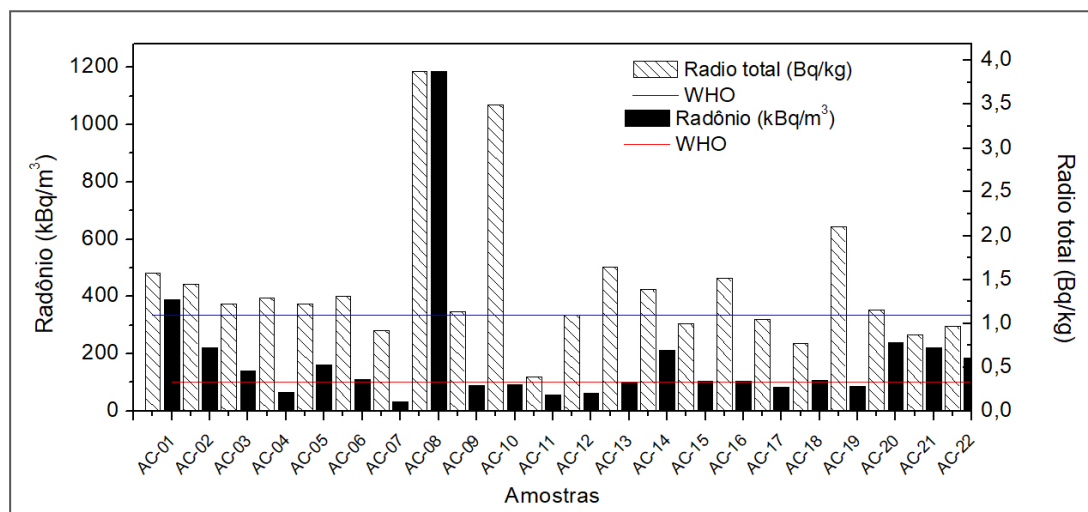


FIGURA 3 - Resultados agrupados de radônio (Bq/L) e rádio total (Bq/L) e seus respectivos limites para potabilidade de água para consumo humano. Fonte: Elaborada pela autora.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo está situada na Província Uranífera de Lagoa Real, que é uma das maiores do mundo e, por conseguinte, imprime características peculiares ao substrato cristalino local. Elementos químicos, mesmo que ocorram naturalmente no meio ambiente, podem produzir efeitos adversos à saúde imediatos quando são ingeridos em altas concentrações. Dentre os elementos radioativos analisados, o  $^{228}\text{Ra}$  apresenta-se em concentrações maiores que o limites estabelecido pela Portaria 2914/2011 em todos os poços. Isso pode ser explicado pela concentração maior do seu progenitor, o tório, que é três vezes mais abundante na crosta terrestre do que o urânio. A mobilidade de rádio pode ser influenciada pelo pH, deslocamento da partícula alfa (*alpha recoil*) e/ou competição com outros cátions divalentes. O radônio encontra-se dissolvido nas águas subterrâneas e pode migrar por longas distâncias através de estruturas tectônicas (falhas e fraturas) e dependendo da velocidade do fluxo da água subterrânea e pelo processo de difusão diretamente do mineral. Isto ocorre logo após o decaimento do seu elemento-pai e faz com que os teores de  $^{222}\text{Rn}$  sejam muito maiores que o  $^{226}\text{Ra}$ . As concentrações de radônio variaram amplamente, sendo que registros acima do limite estabelecido pela Organização Mundial da Saúde foram detectados em quatorze dos vinte e dois poços, na sua maioria, situados nas proximidades de falhas e fraturas regionais.

Existem métodos que podem ser aplicados com a finalidade de remover grande parte do urânio da água como a filtração (ou coagulação), osmose reversa e troca aniônica que pode chegar a remover 100% do urânio da água. A utilização de filtros com troca iônica combinados com a coagulação é eficaz para mitigar a exposição do rádio, e

pode ser aplicada como forma de diminuição destes em água, em virtude do rádio possuir alto teor de adsorção com partículas de argila e óxidos hidratados. Na área ocorre uma grande amplitude de concentração de radônio, sendo acima do limite em quatorze poços. No entanto, devido sua meia-vida curta de 3,8 dias, ações mitigatórias são simples e não envolvem altos custos, como por exemplo, a não utilização da água imediatamente e sua disposição em caixas d'água externas para o gás ser dissipado na atmosfera, o que ocorre com maior eficiência se a água for borrifada ou aspergida ao entrar no reservatório.

## REFERÊNCIAS

- BASTOS-LEAL, L. R.; TEIXEIRA, W.; CUNHA, J. C.; MACAMBIRA, M. J. B. Crustal evolution of Gavião block of the São Francisco Craton: a geochronological study with U-Pb, Pb-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr and K-Ar. *In*: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 2., 1997, Campos do Jordão. **Extended abstracts**. Campos do Jordão: Universidade de São Paulo, 1997. p. 161-162.
- BONOTTO, D. M.; SILVEIRA, E. G. **Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais**. São Paulo: Editora UNESP, 2006. 160 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. 2017. Disponível em: [http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005\\_03\\_10\\_2017.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html). Acesso em: 18 mar. 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html). Acesso em: 18 mar. 2021.

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 396/2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 66, p. 64-68, 7 abr. 2008.
- CORRÊA, J. N.; PASCHUK, S. A.; KAPPKE, J.; DENYAK, V.; SCHELIN, H. R.; DEL CLARO, F.; PERNA, A. F. N.; REQUE, M.; ROCHA, Z.; SANTOS, T. O. Monitoramento da radioatividade alfa relacionada ao radônio-222 em águas de poços da região metropolitana de Curitiba (PR). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 243-250, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000124599>
- COSTA, P. H. O.; ANDRADE, A. R. F.; LOPES, G. A.; SOUZA, S. L. **Projeto Lagoa Real**: mapeamento geológico, 1:25.000. Salvador: CBPM, 1985. 12 v.
- CRUZ, S. C. P.; ALKMIM, F. F.; LEITE, JORDT-EVANGELISTA, C. M. M.; H.; CUNHA, J. C.; MATOS, E. C.; NOCE, C. M.; MARINHO, M. M. Geologia e arcabouço estrutural do Complexo Lagoa Real, Vale do Paramirim, Centro-Oeste da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, p. 128-146, 2007. Suplemento. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200737S4128146>
- HANSLIK, E.; MANSFELD, A. Removal of radium of drinking water. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The environmental behavior of radium**. Viena: IAEA, 1990. (Technical Report Series, 310).
- KURTTIO, P.; KOMULAINEN, H.; LEINO, A.; SALONEN, L.; AUVINEN, A.; SAHA, H. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. **Environmental Health Perspectives**, v. 113, n. 1, p. 68-72, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.7475>
- LIMA, R. A. **Avaliação da dose na população da região urano-fosfática do Nordeste que utiliza os recursos hídricos da região**. 178 f. 1996. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1996. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10470>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- PLANT, J. A.; VOULVOULIS, N.; RAGNARSDOTTIR, K. V. (ed.). **Pollutants, human health, and the environment: a risk based approach**. Reino Unido: John Wiley & Sons, 2012.
- PRADO, G. R. **Estudo de contaminação ambiental por urânio no município de Caetité-Ba, utilizando dentes de humanos como bioindicadores**. 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2007. Disponível em: <http://www.biblioteca.uesc.br/biblioteca/bdtd/200560033D.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2021.
- SILVA, L. S. **Avaliação da radioatividade natural em águas potáveis, de superfície e subterrâneas da região de Caetité, BA**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10065>. Acesso em: 19 mar. 2021.
- SOUZA, J. D. de; MELO, R. C. de; KOSIN, M. (coord.). **Mapa geológico do estado da Bahia**. Versão 1.1. Salvador: CPRM, 2003. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/8665>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- UNITED NATION SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Sources and effects of ionizing radiation**: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly with scientific Annexes. New York: United Nations, 2000.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National primary drinking water regulations: Radon-222**. Washington, D.C.: EPA, 1999.
- VINSON, D. S.; VENGOSH, A.; HIRSCHFELD, D.; DWYER, G. S. Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA). **Chemical Geology**, v. 260, n. 3/4, p.159-171, Mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.022>
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**: fourth edition incorporating the first addendum. 4th ed. Switzerland: WHO, 2017. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 19 mar. 2021.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Uranium in Drinking-water**: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. Switzerland: WHO, 2011. Disponível em: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/uranium290605.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/uranium290605.pdf). Acesso em: 19 mar. 2021.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO handbook on indoor radon: a public health perspective**. Switzerland: WHO, 2009. Disponível em: [https://www.who.int/ionizing\\_radiation/env/9789241547673/en/](https://www.who.int/ionizing_radiation/env/9789241547673/en/). Acesso em: 18 mar. 2021.



SERVIÇO GEOLÓGICO  
DO BRASIL – CPRM

**INFORME TÉCNICO-CIENTÍFICO DE PREVENÇÃO DE  
DESASTRES E ORDENAMENTO TERRITORIAL**

**V.2, N.1, mar. 2021**

Publicação on-line seriada do Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial  
Departamento de Gestão Territorial – DEGET

Disponível em: [rigeo.cprm.gov.br](http://rigeo.cprm.gov.br)

Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Av. Pasteur, 404 Urca - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL  
CEP: 22.290-255

Telefone:(21) 2295-0032

Contatos: [seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br) / [solicita.deget@cprm.gov.br](mailto:solicita.deget@cprm.gov.br)

**COMISSÃO DE PUBLICAÇÃO**

**Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial:** Alice Silva de Castilho

**Departamento de Gestão Territorial:** Diogo Rodrigues da Silva

**Corpo editorial:** Carlos Schobbenhaus Filho, Cassio Roberto Silva, Maria Adelaide Mansini Maia, Maria Angélica Barreto, Sandra Fernandes da Silva, Diogo Rodrigues da Silva.

**Editor:** Eduardo Paim Viglio

**Corpo de revisores:** Aline Costa Nogueira, André Luis Invernizzi, Débora Lamberty, Douglas da Silva Cabral, Heródoto Góes, Iris Celeste Nascimento Bandeira, Ivan Bispo de Oliveira Filho, José Luiz Marmos, Júlio César Lana, Marcelo Eduardo Dantas, Marcelly Ferreira Machado, Melissa Franzen, Michele Silva Santana, Patrícia da Fonseca Almeida, Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff, Raimundo Almir Costa da Conceição, Rogério Valença Ferreira, Sheila Gatinho Teixeira, Thiago Dutra dos Santos e Tiago Antonelli.

**Revisão de texto:** Cristiane Neres Silva

**Normalização bibliográfica:** Rede de Bibliotecas Ametista

**Editoração eletrônica:** Divisão de Editoração Geral – DIEDIG