

RADIONUCLÍDEOS NATURAIS EM SOLOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE, PERNAMBUCO, E RISCOS ASSOCIADOS

AMARAL, Déric Soares do¹
RAMOS, Mariana Luiza Oliveira dos Santos²
FARIAS, Emerson Emiliano Gualberto de³
SOUZA NETO, João Aduino de⁴
FRANÇA, Elvis Joacir de⁵

RESUMO

A Região Metropolitana do Recife encontra-se em área de ocorrência de fosforito uranífero - rocha associada sedimentar à ocorrência de radionuclídeos naturais no solo. A exposição prolongada à radiação ionizante representa risco à saúde, podendo levar ao aumento significativo de desenvolvimento de câncer. Neste estudo, foram quantificados os radionuclídeos naturais Ra-226, Ra-228 e K-40 em solos destas áreas utilizando Espectrometria Gama de Alta Resolução. Os resultados serviram para o cálculo valores de índices de risco da radiação: índice gama, índice alfa, dose absorvida, dose efetiva e risco adicional de desenvolvimento de câncer. Foram encontradas concentrações de atividade de Ra-226 e Ra-228 até 3,5 vezes maiores que a média da crosta terrestre, e concentrações de K-40 cerca de 3 vezes menores do que a média. Devido a isso, foram estimados valores de dose absorvida devido à presença destes nuclídeos nos solos até 1,5 vez maiores do que a média mundial, e do risco adicional de desenvolvimento de câncer comparável ao de locais cuja radiação natural de fundo é considerada alta. Os resultados aqui encontrados indicam a necessidade de maior investigação e monitoramento quanto à radioatividade natural nas áreas estudadas devido aos possíveis riscos à saúde da população que representam.

PALAVRAS-CHAVE: Análises ambientais. Química Ambiental. Radioatividade natural. Risco adicional de desenvolvimento de câncer.

NATURAL RADIONUCLIDES IN SOILS IN THE METROPOLITAN REGION OF RECIFE, PERNAMBUCO, AND ASSOCIATED RISKS

ABSTRACT

The Metropolitan Region of Recife is located in an area of occurrence of uraniferous phosphorite - a sedimentary rock associated with the occurrence of natural radionuclides in the soil. Prolonged radiation exposure represents a health risk and can lead to a significant increase in the development of cancer. In this study, the natural radionuclides Ra-226, Ra-228 and K-40 were quantified in soils from these areas using High Resolution Gamma Spectrometry. The results were used to calculate the values of radiation risk indexes: gamma index, alpha index, absorbed dose, effective dose and additional risk of developing cancer. Activity concentrations of Ra-226 and Ra-228 were found up to 3.5 times higher than the Earth's crust average, and K-40 concentrations about 3 times lower than the average. Because of this, absorbed dose values were estimated due to the presence of these nuclides in soils up to 1.5 times greater than the world average, and excess lifetime cancer risk were comparable to that of places whose natural background radiation is considered high. The results found here indicate the need for further investigation and monitoring of natural radioactivity in the studied areas due to the possible health risks they represent to the population.

KEYWORDS: Environmental analysis. Environmental chemistry. Natural radioactivity. Excess lifetime cancer risk.

¹ Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: dericsoares@gmail.com

² Doutora em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: marianasantos_ufpe@hotmail.com

³ Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: emersonemiliano@yahoo.com.br

⁴ Docente do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: adauto@ufpe.br

⁵ Pesquisador do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste e Docente do Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: elvis.franca@cnen.gov.br

1. INTRODUÇÃO

Em média, 70% da exposição do ser humano à radiação ionizante se deve à radiação natural, ou seja, aquela proveniente de fontes não-produzidas pelo homem e que ocorrem naturalmente no ar, água, solo, plantas, alimentos, etc. (UNSCEAR, 2010; NADALETI *et al*, 2016). Entre os isótopos radioativos (radioisótopos, ou ainda radionuclídeos) que mais contribuem para este valor estão: Rn-222, Ra-226, Th-232 e K-40 (WHO, 2009; ISINKAYE *et al*, 2018). Uma vez que estes radionuclídeos não estão distribuídos uniformemente ao redor da Terra. Os níveis de radioatividade terrestre variam dependendo da concentração dos radionuclídeos naturais nas rochas, solos, águas, vegetais e alimentos das regiões do nosso planeta (UNSCEAR, 2000; ROZAS *et al*, 2016).

Nos solos, um dos principais fatores que influenciam as concentrações dos radionuclídeos naturais são as composições de suas rochas matrizes formadoras (UNSCEAR, 2000; ALMAYAHY *et al*, 2012). A ocorrência de rochas uraníferas em uma região, portanto, significa além da existência de elevados teores de urânio no solo, a possibilidade da presença elevadas quantidades de Ra-226 no solo e de Rn-222 no gás que permeia aquele solo, uma vez que ambos são gerados a partir de decaimentos radioativos sucessivos do U-238 (ALMAYAHY *et al*, 2012).

Altas concentrações de radionuclídeos naturais no solo pode levar ao aumento da exposição externa à radiação gama dos seres humanos (PENABEI *et al*, 2018). Conseqüentemente, há aumento da dose efetiva anual para populações que vivem nessas áreas, o que representa risco radiológico à saúde devido ao aumento do risco de ocorrências de efeitos estocásticos da radiação nesses indivíduos (como o desenvolvimento de câncer) (TURNER, 2007).

É nesse contexto em que está inserida a Região Metropolitana do Recife (RMR). Ao norte de Recife, percorrendo uma faixa descontínua que se estende através das cidades de Olinda, Paulista, Abreu e Lima e Igarassu, há ocorrências de fosforito uranífero já conhecidas há décadas (SOUZA *et al*, 2016). Estas rochas são encontradas em subsuperfície, variando de centímetros a metros, com afloramentos visíveis em alguns bairros dos municípios de Paulista e de Abreu e Lima que foram estudados na presente pesquisa científica (SOUZA *et al*, 2016).

A Figura 1 apresenta um desses afloramentos, que foi encontrado com auxílio de um cintilômetro portátil (um detector de radiação gama ambiental) por Souza *et al* (2016) em pesquisa de campo.

Figura 1 – Afloramento de fosforito uranífero em Paulista, Pernambuco, encontrado com auxílio de um detector de radiação gama ambiental.



Fonte: Souza *et al* (2016).

As áreas de ocorrência do fosforito uranífero em solos da RMR, portanto, são de especial interesse para a proteção radiológica e a saúde pública. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo determinar concentrações de atividade de Ra-226 em amostras de solos com ocorrência de fosforito uranífero próxima à superfície nos bairros do Fosfato (FO), município de Abreu e Lima, e Paratibe (PB) e Pau Amarelo (PA), município de Paulista. Também foram quantificados nas mesmas amostras os teores de Th-232 e K-40, que como já citado, são dois dos radionuclídeos que mais contribuem para a exposição à radiação ionizante natural. Isto foi feito para que fosse possível melhor avaliação dos possíveis riscos radiológicos à saúde da população desses locais por meio dos cálculos de índices de riscos radiológicos preconizados pela *European Commission* (1999). Dessa forma, foram calculados no presente trabalho: índices alfa e gama, taxa de dose gama absorvida um metro acima destes solos, dose efetiva anual devido à presença desses radionuclídeos nos solos e risco adicional de desenvolvimento de câncer, a fim de avaliar mais detalhadamente os riscos a saúde da população das áreas estudadas devido à presença destes radionuclídeos naturais nos solos.

2. METODOLOGIA

2.1 ESCOLHA DAS UNIDADES AMOSTRAIS

A escolha dos locais de amostragem foi feita a partir de um levantamento radiométrico da radiação de fundo em áreas com ocorrências de fosforito uranífero próximas à superfície nos bairros do Fosfato, Paratibe e Pau Amarelo. Este levantamento foi realizado utilizando um cintilômetro portátil, modelo Saphymo Srat SPP/2, da Saphymo GmbH[®], que é capaz de medir a radiação gama no ambiente, e que foi calibrado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (Figura 2). As medições foram realizadas a 0,7 m do solo percorrendo transectos de no mínimo 100 m.

Figura 2 - Cintilômetro Portátil utilizado no estudo



Fonte: Arquivo dos autores.

Os locais com resultados anômalos para cada região foram escolhidos como unidades amostrais (acima de 100 contagens por segundo (cps) para Fosfato, de 50 cps para Paratibe, e de 45 cps para Pau Amarelo). Suas coordenadas geográficas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas geográficas das unidades amostrais.

Unidade Amostral	Latitude	Longitude
FO01	7°53'46"S	34°53'33"W
FO02	7°53'45"S	34°53'33"W
FO03	7°53'39"S	34°53'34"W
FO04	7°53'42"S	34°53'34"W
FO05	7°53'39"S	34°53'34"W
PB01	7°56'25"S	34°53'54"W
PB02	7°56'24"S	34°53'54"W
PB03	7°56'19"S	34°53'53"W
PB04	7°56'18"S	34°53'53"W
PB05	7°56'01"S	34°53'54"W
PA01	7°53'48"S	34°49'46"W
PA02	7°53'48"S	34°49'43"W
PA03	7°53'58"S	34°49'45"W
PA04	7°53'48"S	34°49'36"W

Fonte: Dados da pesquisa.

2.2 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As coletas foram realizadas entre os meses de abril e outubro (outono e inverno na região) em dias sem chuvas. Em cada local foram coletadas amostras simples de solo em triplicata, a 10 cm da superfície, com aproximadamente 100 g de massa cada. Em laboratório do Serviço de Monitoração Ambiental do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (SEAMB/CRCN-NE), as amostras foram secas em estufa à 60° C e cominuídas até tamanho de partículas inferior a 80 µm. Alíquotas de aproximadamente 40 g de cada amostra foram transferidas para recipientes cilíndricos de polietileno que foram hermeticamente selados.

Os recipientes foram armazenados sob condições controladas de temperatura (24°C) e umidade relativa do ar (60%) por um período de 30 dias. Este foi o tempo necessário necessário para que os radionuclídeos-filhos de interesse do Ra-226 entrassem em equilíbrio secular. Assim eles puderam ser quantificados por Espectrometria Gama de Alta Resolução (EGAR) e os teores de Ra-226 em cada amostra foi estimado a partir destes valores.

2.3 QUANTIFICAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS NOS SOLOS

Para a quantificação de Ra-226, Th-232 e K-40 nos solos empregando a EGAR foram utilizados detectores de Germânio Hiperpuro (HPGe) de modelos GC4019 e GC1022 semelhantes ao da Figura 3, ambos produzidos pela Canberra®. Os detectores possuíam eficiência relativa, respectivamente, de 40% e 10%, e resolução (FWHM) de 2,14 keV e 1,64 keV no fotopico de energia 1332,50 keV do Co-60.

Figura 3 – Sistema EGAR utilizado para determinação de radionuclídeos naturais nos solo



Fonte: Arquivo dos autores.

A calibração em energia dos espectrômetros gama foram realizadas utilizando fontes padrões pontuais seladas de Co-60, Eu-152 e Am-241 certificadas pelo IRD/CNEN. Estes radionuclídeos geram vários fotopicos gama com boas probabilidades de emissão, dessa foram as energias utilizadas para a calibração estiveram distribuídas por todo o espectro.

Os radionuclídeos de interesse foram os produtos de decaimento do Ra-226 e do Th-232 que se encontravam em equilíbrio secular, e o K-40. Portanto as concentrações de atividade do Ra-226 (A_{Ra}) foram estimadas utilizando as concentrações de atividade do Pb-214 e do Bi-214, que foram calculadas a partir da média dos valores encontrados para os raios gama de energias 351,9 keV e 1764,5 keV, respectivamente. Analogamente, as atividades do Th-232 (A_{Th}) foram estimadas a partir das concentrações de atividade do Ac-228, que foram calculadas a partir das médias dos valores

encontrados para os raios gamas de energias 911,2 keV e 964,7 keV. As concentrações de K-40 (A_K) foram determinadas a partir dos valores encontrados para os raios gama de energia 1460,82 keV. As medições das atividades destes radionuclídeos em cada amostra de solo foram realizadas durante 80.000 segundos. Todos os cálculos foram realizados no programa de computador Genie 2000, produzido pela Canberra® utilizando o protocolo descrito por Paiva *et al* (2016).

O controle da qualidade do procedimento analítico foi realizado quantificando as concentrações de atividade de Ra-226, Ra-228 e K-40 em alíquotas de um padrão interno de solo do Programa Nacional de Intercomparação (PNI) fornecido pelo Instituto de Radiometria e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IRD/CNEN) e no Material de Referência IAEA 314 – *Soil Stream*, utilizando o mesmo protocolo analítico que foi utilizado para as amostras. Utilizou-se o número E_n como ferramenta estatística para avaliação da qualidade do procedimento analítico (ISO, 2005).

2.4 AVALIAÇÃO DE RISCOS À SAÚDE DEVIDO À RADIAÇÃO

Para a avaliação dos riscos associados à presença destes radioisótopos naturais nos solos estudados, foram calculados Índices Gama (I_γ) segundo a Equação 1, definida pela *European Commission* (1999). Esta é uma ferramenta para estimar o risco relacionado à radiação gama emitida por pelos radionuclídeos naturais presentes nas amostras de solo.

$$I_\gamma = \left(\frac{A_{Ra}}{300}\right) + \left(\frac{A_{Th}}{200}\right) + \left(\frac{A_K}{3000}\right) \quad (1)$$

Para estimar o risco associado à radiação alfa emitida por radionuclídeos naturais presentes nos solos, foram calculados Índices Alfa (I_α) como preconiza a *European Commission* (1999) (Equação 2):

$$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200} \quad (2)$$

Também foram calculadas as taxas de dose absorvidas um metro acima dos solos avaliados devido à presença de radionuclídeos naturais. Para isso foi utilizada a Equação 3, recomendada pela *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* - UNSCEAR (2000):

Com base nos resultados obtidos, foi possível também estimar a dose efetiva anual para um indivíduo exposto a cada taxa de dose absorvida calculada. Foi utilizada a Equação 4, preconizada pela *European Commission* (1999) para estes cálculos:

$$E = D \times 8766 \times 0,7 \times 10^{-6} \quad (4)$$

Por fim, foi calculado o risco adicional de desenvolvimento de câncer (RADC) devido às doses efetivas anuais recebidas pelos indivíduos que vivem sobre os solos estudados. Para isso foi utilizada a Equação 5 preconizada pela *International Commission On Radiological Protection - ICRP* (2007):

$$RADC = H_T \times TV \times RF \quad (5)$$

onde: H_T é a dose efetiva anual equivalente (como estamos avaliando raios gama é a igual à dose efetiva anual); TV é o tempo de vida, estimado em 66 anos para os resultados serem comparáveis aos encontrados na literatura (MOHAMMED; AHMED, 2017); e RF é o risco fatal, definido como $0,05 \text{ Sv}^{-1}$ pela ICRP (2007).

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 QUANTIFICAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS NOS SOLOS

Os valores de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais quantificados por EGAR no padrão de solo do PNI/IRD e no material de referência IAEA 314 e os valores certificados e suas respectivas incertezas expandidas em nível de 95% de confiança estão apresentados na Tabela 2. Além deles, os valores de Número E_n também estão apresentados nesta tabela. Uma vez que todos os valores do Número E_n estão entre -1 e 1, a qualidade do procedimento analítico utilizado no presente estudo para quantificar Ra-226, Th-232 e K-40 em amostras de solo foi atestada em nível de 95% de confiança (ISO, 2005).

Tabela 2 - Valores utilizados para avaliação da qualidade do procedimento analítico

Nuclídeo	Padrão de solo do PNI/IRD		Número E _n	n*
	Valor obtido (Bq kg ⁻¹)	Valor certificado (Bq kg ⁻¹)		
K-40	353±36	396±69	-0,6	2
Pb-212	44±3	47±8	-0,3	2
Ac-228	44±16	48±8	-0,7	2

Nuclídeo	IAEA – 314 Soil Stream		E _n	n*
	Valor obtido (Bq kg ⁻¹)	Valor certificado (Bq kg ⁻¹)		
Ra-226	707±24	709±10	-0,48	4

Fonte: Dados da pesquisa. *n = número de repetições

Em seguida, estão apresentados na Tabela 3 os valores de concentrações de atividade de Ra-226, Th-232 e K-40 nos solos estudados que foram quantificados por Espectrometria Gama de Alta Resolução.

Tabela 3 – Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais nos solos avaliados

Solo	Ra-226 (Bq Kg ⁻¹)	Th-232 (Bq Kg ⁻¹)	K-40 (Bq kg ⁻¹)
FO01	114±7	55±3	25±7
FO02	127±13	39±3	27±7
FO03	91±6	66±3	50±12
FO04	98±6	65±3	41±11
FO05	102±6	41±3	< 10
PB01	17±4	54±4	36±7
PB02	< 10	15±2	9,6±1,0
PB03	< 10	14±2	12±3
PB04	< 10	47±3	15±5
PB05	< 10	19,6±1,8	6±2
PA01	< 10	13,7±1,8	118±6
PA02	< 10	26±2	49±5
PA03	< 10	26±2	98±10
PA04	< 10	19±4	119±5

Fonte: Dados da pesquisa

As concentrações de atividade de Ra-226 nos solos analisados variaram entre valores menores que 10 Bq kg⁻¹ (limite de detecção) até 127 Bq kg⁻¹. O bairro do Fosfato, em Abreu e Lima, apresentou os maiores teores deste radionuclídeo, com média de 106 Bq kg⁻¹ para seis solos estudados. Este valor é aproximadamente 3,5 vezes maior do que da média para a crosta terrestre (32 Bq kg⁻¹) (UNSCEAR, 2000). Já os solos estudados pertencentes ao município de Paulista apresentaram

concentração de atividade deste radioisótopo, em sua maioria, abaixo do limite de detecção. Os valores de atividade de Ra-226 nos solos estudados de Paratibe e Pau Amarelo, portanto, são menores do que a média mundial, o que indica menores riscos à saúde associados a este nuclídeo nos solos das regiões (UNSCEAR, 2000; PAIVA *et al*, 2016).

Quanto ao Th-232, sua atividade nos solos estudados variou de $13,7 \pm 1,8$ a 66 ± 3 Bq kg⁻¹. Os solos de Pau Amarelo apresentaram os menores teores desse radionuclídeo, com valor médio de 21 ± 2 Bq kg⁻¹, ou seja, abaixo da média para crosta terrestre do valor para Th-232 (25 Bq kg⁻¹) (PAIVA *et al*, 2016). Por outro lado, os valores médios encontrados nos solos dos bairros do Fosfato e de Paratibe, 53 ± 3 Bq kg⁻¹ e 30 ± 2 Bq kg⁻¹ respectivamente, foram maiores do que a média mundial. Indicando, especialmente para o Fosfato, onde a média da atividade de Th-232 foi 2 vezes maior do que a média mundial, possibilidade de existência de risco radiológico à saúde da população.

Por sua vez, os valores das concentrações de atividade de K-40 em todos os solos estudados apresentaram-se pelo menos 3 vezes abaixo da média para a crosta terrestre, que é 420 Bq kg⁻¹ (UNSCEAR, 2000). Este fato indica que este radioisótopo do potássio tem pouca contribuição para a dose efetiva à qual os indivíduos que habitam as regiões estudadas estão expostos.

3.2 AVALIAÇÃO DE RISCOS À SAÚDE DEVIDO À RADIAÇÃO

Os valores de Índice Gama e Índice Alfa estão calculados para avaliação dos riscos associados à emissão de radiação gama e alfa, respectivamente, pelos radionuclídeos naturais presentes nos solos estudados da RMR estão apresentados na Tabela 4.

Todos os solos estudados apresentaram valores de Índice Gama e Índice Alfa abaixo do limite máximo recomendado ($I_\gamma \leq 1$; $I_\alpha \leq 1$) pela *European Commission* (1999). Este fato indica que, apesar de alguns dos solos apresentarem teores de Ra-226 e Th-232 acima da média da crosta terrestre, todos os solos estudados possivelmente são seguros com relação às emissões alfa e gama provenientes de radionuclídeos naturais. Apesar disso, os valores encontrados para as os solos Bairro do Fosfato são claramente superiores aos das outras duas regiões - cerca de 2 vezes para o I_γ e 10 vezes para o I_α . Com isso, ressalta-se a necessidade de investigação e monitoração dos níveis de radionuclídeos naturais não somente nos solos do Bairro do Fosfato – Abreu e Lima, mas também em outras matrizes como o ar de ambientes indoor e águas subterrâneas que sejam consumidas pela população, por exemplo.

Tabela 4 – Valores de Índice Gama (I_γ) e Índice Alfa (I_α) para os solos estudados

Solo	I_γ	I_α
FO01	0,39 ± 0,04	0,57 ± 0,03
FO02	0,43 ± 0,06	0,63 ± 0,06
FO03	0,32 ± 0,04	0,45 ± 0,03
FO04	0,34 ± 0,04	0,49 ± 0,03
FO05	0,34 ± 0,03	0,51 ± 0,03
PB01	0,34 ± 0,03	0,09 ± 0,02
PB02	<0,11	<0,05
PB03	<0,10	<0,05
PB04	<0,27	<0,05
PB05	<0,13	<0,05
PA01	<0,14	<0,05
PA02	<0,18	<0,05
PA03	<0,16	<0,05
PA04	<0,17	<0,05

Fonte: Dados da pesquisa

Os valores de das taxas de dose absorvida gama um metro acima dos solos (D), de doses efetivas anuais (E) e de risco adicional de desenvolvimento de câncer (RADDC) decorrentes da presença dos radionuclídeos naturais nos solos estudados estão apresentados na Tabela 5.

As taxas de doses absorvidas um metro acima dos solos do Fosfato são cerca de 1,5 vez maiores do que a média para a crosta terrestre que é de 55 nGy h⁻¹ de acordo com o relatório da UNSCEAR (2000). Por outro lado, todos os solos estudados do município de Paulista apresentaram valores abaixo desta média. Este parâmetro nos traz mais um indicativo de que a região do Fosfato, em Abreu e Lima, necessita de um estudo mais aprofundado acerca das concentrações de radionuclídeos naturais nas suas diversas matrizes ambientais.

Os valores de dose efetiva anual para pessoas adultas apresentaram-se, para todos os locais de estudo, abaixo de 1 mSv ano⁻¹, valor máximo recomendado pela *European Commission* (1999). No entanto, ao se considerar que esta não é a única fonte de radiação que contribui para dose efetiva anual para a população dessas regiões, é possível que o somatório de contribuições de fontes naturais presentes em outras matrizes torne a dose efetiva anual maior do que este limite máximo.

Tabela 5 – Valores calculados para análise mais aprofundada dos possíveis riscos devido à presença de radionuclídeos naturais nos solos

Solo	D (nGy h ⁻¹)	E (mSv ano ⁻¹)	RADC
FO01	88 ± 5	0,54 ± 0,03	1,8 x 10 ⁻³
FO02	84 ± 8	0,51 ± 0,05	1,7 x 10 ⁻³
FO03	85 ± 5	0,52 ± 0,03	1,7 x 10 ⁻³
FO04	87 ± 5	0,53 ± 0,03	1,7 x 10 ⁻³
FO05	73 ± 4	0,45 ± 0,02	1,4 x 10 ⁻³
PB01	43 ± 4	0,30 ± 0,03	9,9 x 10 ⁻⁴
PB02	< 15	< 0,09	< 3,0 x 10 ⁻⁴
PB03	< 13	< 0,08	< 2,6 x 10 ⁻⁴
PB04	< 35	< 0,21	< 6,9 x 10 ⁻⁴
PB05	< 17	< 0,10	< 3,3 x 10 ⁻⁴
PA01	< 18	< 0,11	< 3,6 x 10 ⁻⁴
PA02	< 23	< 0,14	< 4,6 x 10 ⁻⁴
PA03	< 4	< 0,02	< 6,6 x 10 ⁻⁵
PA04	< 21	< 0,13	< 4,2 x 10 ⁻⁴

Fonte: Dados da pesquisa

De acordo com o *National Cancer Institute* (2009), um homem norte-americano tem 44% de risco de desenvolvimento de algum tipo de câncer ao longo da vida, enquanto uma mulher norte-americana tem 38% de risco. O Risco Adicional de Desenvolvimento de Câncer é, como o próprio nome diz, o risco adicional que um indivíduo pode ter de desenvolver câncer ao ser exposto a algum material carcinogênico. É considerado aceitável um risco adicional de 1 chance em 100.000, ou 1×10^{-5} (QURESHI *et al*, 2014). O presente estudo estimou valores de RADC, principalmente para o bairro do Fosfato, até 200 vezes maiores do que este limite e maiores do que a média mundial de $1,45 \times 10^{-3}$ (UNSCEAR, 2000).

O valor médio de RADC para o bairro do Fosfato, em Abreu e Lima, também é comparado na com valores encontrados na literatura (Tabela 6). Neste comparativo vê-se que os radionuclídeos naturais presentes nos solos do Fosfato representam risco adicional de desenvolvimento de câncer semelhantes ao de locais cuja radiação de fundo natural é considerada alta, como nas praias do estado de Kerala, Índia, e na cidade de Ad Dayer, Iraque (RAMASAMY *et al*, 2013; MOHAMMED; AHMED, 2017). Este é mais um fato que corrobora a necessidade de análises radiométricas mais aprofundadas nas diferentes matrizes nesta região.

Tabela 6 – Comparação entre o valor médio de RADC calculado para o bairro do Fosfato, Abreu e Lima, neste estudo e diversas regiões do mundo

Área de estudo	RADC (10^{-3})	Fonte
Delta do Rio Níger, Nigéria	Desconsiderável	Emelue <i>et al</i> (2014)
Kerala, Índia	1,70	Ramasamy <i>et al</i> (2013)
Kirklareli, Turquia	0,50	Aytas <i>et al</i> (2012)
Província de Tulkarem, Palestina	0,95	Thabanayeh e Jazzar (2012)
Azad Kashmir, Paquistão	2,17	Rafique <i>et al</i> (2014)
Abu Al Kasib, Iraque	1,84	Mohammed e Ahmed (2017)
Ad Dayer, Iraque	1,67	Mohammed e Ahmed (2017)
Fosfato, Abreu e Lima, Brasil	1,68	Presente estudo

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como esperado, foram encontradas altas concentrações de atividade de radionuclídeos naturais, principalmente de Ra-226, em áreas com ocorrência de fosforito uranífero na RMR.

O bairro do Fosfato, Abreu e Lima, apresentou os maiores valores de concentração de atividade, e por consequência de índices de risco da radiação ionizante, especialmente taxas de dose absorvida gama e dose efetiva anual devido aos radionuclídeos naturais presentes em seu solo. Apesar de todos estes valores se encontrarem dentro dos limites máximos estabelecidos, indicam a necessidade de avaliação de outras matrizes ambientais da área quanto aos teores de radionuclídeos naturais. Isto porque, o somatório da exposição à radiação ionizante proveniente dessas diversas matrizes (águas subterrâneas, ar dos ambientes internos, materiais de construção) pode fazer estes limites serem excedidos.

O Risco Adicional de Desenvolvimento de Câncer causado por estes radionuclídeos presentes no solo do Fosfato que foi calculado neste estudo confirma a necessidade de investigação mais aprofundada nesta região. Isto porque este valor é comparável ao de regiões consideradas de alta radiação natural de fundo e que apresentam números de casos de câncer elevados.

REFERÊNCIAS

- ALMAYAH, B. A.; TAJUDDIN, A. A.; JAAFAR, M. S. Radiation hazard indices of soil and water samples in Northern Malaysian Peninsula. **Applied Radiation and Isotopes**, vol. 70, n. 11, p. 2652-2660. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.07.021>> Acesso em: 17 out. 2021.
- AYTAS, S.; YUSAN, S.; ASLANI, M. A.; KARALI, T.; TURKOZU, D. A.; GOK, C.; ERENTURK, S.; GOKCE, M.; OGUZ, K. F. Natural radioactivity of riverbank sediments of the Maritza and Tundja Rivers in Turkey. **Journal of Environmental Science and Health, Part A Toxic Hazard Substances Environmental Engineering**, vol. 47, n. 13, p. 2163-2172. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10934529.2012.696436>> Acesso em: 17 out. 2021.
- EMELUE, H. U.; JIBIRI, N. N.; EKE, B. C. Excess Lifetime Cancer Risk due to Gamma Radiation in and Around Warri Refining and Petrochemical Company in Niger Delta, Nigeria. **British Journal of Medicine and Medical Research**, vol. 4, n. 13, p. 2590-2598. 2014. Disponível em: <<https://10.9734/BJMMR/2014/7180>> Acesso em: 17 out. 2021.
- EUROPEAN COMMISSION. **Report on radiological protection principle concerning the natural radioactivity of building materials**. Luxemburgo: European Commission, 1999. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/112.pdf>> Acesso em: 17 out. 2021.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Exeter, Reino Unido: International Committee on Radiological Protection, 2007. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_37_2-4> Acesso em: 17 out. 2021.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- ISO. **Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons**. Genebra, Suíça: International Organization for Standardization, 2005.
- ISINKAYE, M. O.; JIBIRI, N. N.; BAMIDELE, L. A. N. Evaluation of radiological hazards due to natural radioactivity in bituminous soils from tar-sand belt of Southwest Nigeria using HpGe-Detector. **International Journal of Radiation Research**, vol. 16, n. 3, p. 351-362. 2018. Disponível em: <<https://10.18869/acadpub.ijrr.16.3.351>> Acesso em: 17 out. 2021.
- MOHAMMED, R. S.; AHMED, R. S. Estimation of excess lifetime cancer risk and radiation hazard indices in southern Iraq. **Environmental Earth Sciences**, vol. 76, n. 303, p. 1-9. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12665-017-6616-7>> Acesso em: 17 out. 2021.
- NADALETI, W. C.; NEGE, K.; BELI FILHO, P.; ANDREAZZA, P.; QUADRO, M.; CORREA, E. K.; CORREA, L.; LEANDRO, D.; VIEIRA, B. Cinética e equilíbrio secular das principais séries radioativas e suas implicações ambientais. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, vol. 2, n.2, p. 1-16. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.15210/rbes.v2i2.8248>> Acesso em: 17 out. 2021.
- NATIONAL CANCER INSTITUTE. **Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER) Program**. Estados Unidos: Division of Cancer Control & Population Sciences, 2009.

PAIVA, J. D. S.; SOUSA, E. E.; FARIAS, E. E. G.; CARMO, A. M.; SILVA FILHO, C. A.; DE FRANÇA, E. J. Applied tools for determining low-activity radionuclides in large environmental samples. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, vol. 306, n. 3, p. 631-636. 2016. Disponível em: <<https://10.1007/s10967-015-4219-x>> Acesso em: 17 out. 2021.

PENABEI, S.; BONGUE, D.; MALEKA, P.; DLAMINI, T.; SAÏDOU; GHEUMBOU SHOUOP, C. J.; HALAWLAW, Y. I.; NGWA EBONGUE, A; KWATO NJOCK, M. G. Assessment of natural radioactivity levels and the associated radiological hazards in some building materials from Mayo-Kebbi region, Chad. **Radioprotection**, vol. 56, n. 4, p. 1-14. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/radiopro/2018030>> Acesso em: 17 out. 2021.

QURESHI, A. A.; TARIQ, S.; DIN, K. U.; MANZOOR, S.; CALLIGARIS, C.; WAHEED, A. Evaluation of excessive lifetime cancer risk due to natural radioactivity in the rivers sediments of Northern Pakistan. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, vol. 7, n. 4, p. 438-447. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.008>> Acesso em: 17 out. 2021.

RAFIQUE, M.; RAHMAN, S. U.; BASHARAT, M.; AZIZ, W.; AHMAD, I.; LONE, K. A.; AHMAD, K. M. Evaluation of excess life time cancer risk from gamma dose rates in Jhelum valley. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, vol. 7, n. 1, p. 29-35. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2013.11.005>> Acesso em: 17 out. 2021.

RAMASAMY, V.; SUNDARRAJAN, M.; PARAMASIVAM, K.; MEENAKSHISUNDARAM, V.; SURESH, G. Assessment of spatial distribution and radiological hazardous nature of radionuclides in high background radiation area, Kerala, India. **Applied Radiation and Isotopes**, vol. 73, p. 21-31. 2013. Disponível em: <<https://10.1016/j.apradiso.2012.11.014>> Acesso em: 17 out. 2021.

ROZAS, S.; IDOETA, R.; ALEGRÍA, N.; HERRANZ, M. Radiological characterization and radon equilibrium factor in the outdoor air of a post-industrial urban area. **Journal of Environmental Radioactivity**, vol. 151, n. 1, p. 126-135. 2016. Disponível em: <<https://10.1016/j.jenvrad.2015.09.023>> Acesso em 17 out. 2021.

SOUZA, E. M.; FARIAS, E. E. G.; SANTOS, L. L. S.; NEUMANN, V. H.; LIMA FILHO, M. F.; SILVA FILHO, C. A.; NASCIMENTO, A. F.; FRANÇA, E. J. Caracterização do fosforito uranífero no furo 1-IG-03-PE, sub-bacia Olinda, em Igarassu (PE). **Geochimica Brasiliensis**, vol. 30, n. 2, p. 173-183. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21715/GB2358-2812.2016302173>> Acesso em: 17 out. 2021.

THABAYNEH, K. M.; JAZZAR, M. M. Natural radioactivity levels and estimation of radiation exposure in environmental soil samples from Tulkarem Province-Palestine. **Open Journal of Soil Sciences**, vol. 2, n. 1, p. 7-16. 2012. Disponível em: <<https://10.4236/ojss.2012.21002>> Acesso em: 17 out. 2021.

TURNER, J. E. **Atoms, radiation, and radiation protection**. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2007.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION - UNSCEAR. **Sources and effects of ionizing radiation**. Nova Iorque, Estados Unidos: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION - UNSCEAR. **Summary of low-dose radiation effects on health.** Nova Iorque, Estados Unidos: United Nations Publication, 2010. Disponível em: <http://www.unscear.org/docs/reports/2010/UNSCEAR_2010_Report_M.pdf> Acesso em: 17 out. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **WHO handbook on indoor radon: a public health perspective.** Genebra, Suíça: World Health Organization, 2009.