



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

VÁLTER JOSÉ COUTINHO JÚNIOR

Avaliação dosimétrica de areia monazítica e de uma rocha de urânio e tório por meio de simulação computacional utilizando o Método Monte Carlo

UBERLÂNDIA, MG
2021

VÁLTER JOSÉ COUTINHO JÚNIOR

Avaliação dosimétrica de areia monazítica e de uma rocha de urânio e tório por meio de simulação computacional utilizando o Método Monte Carlo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Computacionais e Dispositivos Aplicados à saúde.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

UBERLÂNDIA, MG
2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C871 2021	<p>Coutinho Júnior, Válder José, 1985- Avaliação dosimétrica de areia monazítica e de uma rocha de urânio e tório por meio de simulação computacional utilizando o Método Monte Carlo [recurso eletrônico] / Válder José Coutinho Júnior. - 2021.</p> <p>Orientador: Lucio Pereira Neves. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Biomédica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.90 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia biomédica. I. Neves, Lucio Pereira, 1982- , (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Biomédica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 62:61</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N, Sala 115 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4761 - www.ppegb.feelt.ufu.br - ppegb@feelt.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Biomédica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 073, PPGEB				
Data:	Dez de fevereiro de dois mil vinte e um	Hora de início:	14 horas	Hora de encerramento:	15h17min
Matrícula do Discente:	11912EBI006				
Nome do Discente:	Valter José Coutinho Júnior				
Título do Trabalho:	Avaliação dosimétrica da areia monazítica e rocha de urânio e tório por meio de simulação computacional utilizando o Método Monte Carlo				
Área de concentração:	Engenharia Biomédica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Computacionais e Dispositivos Aplicados à Saúde				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo dosimétrico em Profissionais durante o exame de Tomografia computadorizada utilizando simulação de Monte Carlo				

Reuniu-se em web conferência pela plataforma Google Meet em conformidade com a PORTARIA Nº36, DE 19 DE MARÇO DE 2020 da COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, composta pelos Professores Doutores: Walmir Belinato - IFBA; Gustavo Foresto Brito de Almeida - INFIS/UFU; Lucio Pereira Neves - INFIS/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Lucio Pereira Neves, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do

Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Lucio Pereira Neves, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2021, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walmir Belinato, Usuário Externo**, em 10/02/2021, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Foresto Brito de Almeida, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2021, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2557583** e o código CRC **06031413**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Valter e Dora, pela vida e por todo apoio incondicional que tive até hoje nas minhas decisões. Por sempre valorizarem e priorizarem a educação dos filhos.

Agradeço a UFU por todas as oportunidades que me foram dadas nos últimos anos, seja no ramo profissional, como servidor da universidade, como no acadêmico, durante minha graduação e agora no mestrado.

Agradeço aos professores Dr. Lucio Pereira Neves e Dra. Ana Paula Perini, pela orientação nesse trabalho e por me incentivarem a dar continuidade nos meus estudos. Aos meus colegas Otávio Joaquim Tavares e Lucas Wilian Gonçalves de Souza por contribuírem ativamente com esse trabalho.

Agradeço ao meu namorado e grande companheiro João, por estar comigo durante esse último ano que foi tão difícil para todos, porém, mais ainda para aqueles que estão sozinhos e longe de seus familiares. Ao Beto, meu gato, por estar comigo o dia todo nesse ano de home office, me fazendo companhia e levando minha mente para lugares melhores nas horas mais necessárias.

Agradeço aos amigos, que não citarei para não cometer injustiça, mas que são minha segunda família.

Agradeço ao Dr. Richard Kramer por ceder os objetos simuladores virtuais antropomórficos e ao apoio financeiro: FAPEMIG (Projetos nº APQ-02934-15 e APQ-03049-15) e CNPq (Projetos nº 420699/2016-3 e 421603/2016-0). Por fim, agradeço a Dra. Ana Paula Perini por nos disponibilizar o cluster para realizar as simulações.

Like a roller in the ocean
life is motion
move on
like a wind that's always blowing
life is flowing
move on
like the sunrise in the morning
life is dawning
move on
how I treasure every minute
being part of it
being in it
with the urge to move on

(B. Andersson / S. Anderson / B. Ulvaeus)

RESUMO

Os seres humanos estão expostos a diferentes fontes de radiação natural, porém, devido a fatores provocados pelo homem, essa exposição pode ser acima do recomendado, sendo necessárias medidas de proteção radiológica para as pessoas expostas e controle/minimização da fonte de radiação. Nesse estudo foram levantadas as principais fontes de radiação natural e foram realizadas simulações computacionais utilizando o Método Monte Carlo de forma a determinar a dose recebida por uma pessoa exposta a areia monazítica e uma rocha de urânio e tório. Para realizar a simulação foi utilizado o software MCNP 6.2. Foram levantadas as características químicas da areia e da rocha e para as séries de decaimento dos radionuclídeos ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U , principais responsáveis pela emissão de radiação dos materiais utilizados, e foram identificados os decaimentos com maior probabilidade de ocorrência e que emitiam maior energia. Foi elaborada uma fonte de radiação, incluindo o espaço físico do laboratório, e foram adicionados dois objetos simuladores antropomórfico virtuais representando uma mulher e um homem. Os dados obtidos pela simulação foram os coeficientes de conversão de doses equivalente e efetiva. Foi realizada a análise dos dados coletados, verificando quais órgãos receberam a maior dose sendo que para ambos os objetos simuladores, a mama foi o que apresentou maiores valores de coeficiente de conversão de dose equivalente. Verificou-se que os objetos simuladores antropomórficos virtuais expostos a rocha tiveram doses de radiação maiores que os expostos a areia monazítica. Concluiu-se que utilizar a simulação computacional para realizar um mapeamento dos níveis de exposição de determinado local traz diversas vantagens e possibilidades.

Palavras-chave: NORM. Radiação natural. MCNP. Rocha. Urânio. Tório. Areia monazítica.

ABSTRACT

Humans are exposed to different sources of natural radiation. However, due to man-caused factors, this exposure may be above the recommended, and radiological protection measures are necessary for exposed people, together with control/minimization of the radiation source. For this study, the main sources of natural radiation were identified, and a computational simulation was performed using the Monte Carlo Method to determine the dose received by a person exposed to monazitic sand and a uranium and thorium rock. The MCNP 6.2 software was used to perform the simulation. The chemical characteristics of the sand and rock were traced and for the decay series of radionuclides ^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U - the main culprits of radiation emission in the employed materials - the highest probability of occurrence and highest amount of emitted energy ones were identified. A radiation source was developed, including the physical space of the laboratory, and two virtual anthropomorphic phantoms representing a woman and a man were added. The data obtained by the simulation were the equivalent and effective dose conversion coefficients. The collected data were evaluated, verifying which organs received the highest dose, and in both cases the breast region presented the highest values for equivalent dose conversion coefficient. The virtual anthropomorphic phantoms exposed to rock had higher radiation doses than those exposed to monazitic sand. It was concluded that using computer simulation to perform a mapping of exposure levels of a given location brings several advantages and possibilities.

Keywords: NORM. Natural radiation. MCNP. Rocks. Uranium. Thorium. Monazitic sand.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Séries naturais de decaimento radioativo do ^{40}K	17
Figura 2 - Locais de acúmulo de NORM no processo de extração de petróleo	19
Figura 3 – Planta industrial da Mosaic Fertilizantes em Uberaba – MG	23
Figura 4 – Fontes de NORM em Araxá - MG	23
Figura 5 – Fontes de NORM no Triângulo Mineiro.....	24
Figura 6 - Como o radônio entra na sua casa	26
Figura 7– Praia de Areia Preta – Guarapari – ES.....	30
Figura 8 – Rocha de urânio e tório	33
Figura 9 – Objeto simulador MASH3 e objeto simulador FASH3, da esquerda para a direita	34
Figura 10 – Ambiente simplificado do LERAD, MASH3 e a rocha de urânio e tório sob a bancada (a); FASH3 e garrafa contendo areia monazítica sob a bancada (b); detalhe da geometria da rocha de urânio e tório (c); (d) corte transversal da rocha de urânio e tório.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Séries naturais de decaimento radioativo do ^{232}Th	15
Tabela 2 – Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U	16
Tabela 3 – Atividade dos radionuclídeos NORM em rochas fosfáticas.....	21
Tabela 4 – Atividades médias de ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K e ^{210}Pb em tijolos produzidos com fosfogesso de Uberaba – MG	24
Tabela 5 – Materiais de construção e suas atividades (Bq/kg).....	25
Tabela 6 – Composição química da rocha urânio e tório de Poços de Caldas	29
Tabela 7 – Composição da areia monazítica da Praia de Areia Preta, Guarapari – ES.....	30
Tabela 8 – Valores do fator de ponderação tecidual wT definido na ICRP 60	32
Tabela 9 – Valores de entrada no MCNP 6.2 para definição dos elementos da rocha de urânio e tório.....	37
Tabela 10 – Valores de entrada no MCNP 6.2 para definição dos elementos da areia monazítica.....	38
Tabela 11– Cálculo da frequência de amostragem.....	40
Tabela 12 – CC[H _T] e CC[E] para o objeto simulador antropomórfico feminino FASH3	46
Tabela 13 – CC[H _T] e CC[E] para o objeto simulador antropomórfico masculino MASH3 ...	47
Tabela 14 – CC[E] para os quatro cenários simulados.....	48
Tabela 15– Órgãos com maior valor de CC[H _T] para os cenários simulados	49

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ACI	Activity Concentration Index
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
DEN/UFPE	Grupo de Dosimetria e Instrumentação Nuclear do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco
EUA	Estados Unidos da América
FC	Fator de Conversao
FESH	Female Adult mesh
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INCA	Instituto Nacional de Câncer
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
KERMA	Kinetic Energy Released
LERAD	Laboratório de Ensino em Física das Radiações
LInDa	Laboratório de Instrumentação e Dosimetria
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MASH	Male Adult mesh
NIST	National Institute of Standards and Thecnology
NORM	Naturally Occurring Radioactive Materials
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econmico
OSL	Optically Stimulated Luminescence
PKA	Produto Kerma-rea
PPM	Partes Por Milhão
RI	Radiações Ionizantes
TENORM	Technologically Enhanced NORM
TLD	Thermoluminescent Dosimeter
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ZAID	Nuclide Identification Number

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização do Problema	13
1.2	Objetivos do trabalho	13
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	13
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.3	Relevância do trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Radionuclídeos Naturais	15
2.2	Regulamentação da exposição à radiação	17
2.3	Indústrias que produzem NORM	17
2.3.1	<i>Mineração do carvão e usinas termelétricas movidas a carvão</i>	18
2.3.2	<i>Produção de óleo e gás</i>	18
2.3.3	<i>Metais e fundição</i>	19
2.3.4	<i>Terras raras</i>	20
2.3.5	<i>Produção de fosfato e fertilizantes</i>	21
2.3.6	<i>Materiais de construção</i>	25
2.3.7	<i>Radônio</i>	26
2.4	Método Monte Carlo	27
2.5	Objetos simuladores antropomórficos virtuais	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Monte Carlo N-Particle	28
3.2	Composição química da rocha de urânio e tório e da areia monazítica	28
3.2.1	<i>Composição química da rocha de urânio e tório</i>	28
3.2.2	<i>Composição química areia monazítica</i>	29
3.3	Cálculo dos coeficientes de conversão de dose equivalente, dose efetiva e incertezas	31
3.4	Caracterização da geometria da simulação	32
3.5	Objetos simuladores antropomórficos virtuais MASH3 e FASH3	33
3.6	Arquivo de entrada do MCNP 6.2	35
3.6.1	<i>Materiais</i>	35
3.6.2	<i>Identificador numérico do elemento ou nuclídeo (ZAID)</i>	35
3.6.3	<i>Cálculo dos valores de entrada no cartão de materiais</i>	35

3.6.4	<i>Determinação dos materiais da bancada e da estrutura civil da sala</i>	38
3.6.5	<i>Fonte radioativa</i>	39
3.6.6	<i>Especificação dos tallys</i>	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As radiações ionizantes são um fenômeno natural e estão presentes desde a origem da Terra. A energia liberada no processo de decaimento de átomos instável pode interagir com a matéria e modificar as moléculas (NOUAILHETAS, 2005).

Todos os minerais contêm radionuclídeos de origem natural, dos quais os mais importantes para fins de proteção radiológica são os radionuclídeos das séries de decaimento ^{238}U e ^{232}Th . Para a maioria das atividades humanas envolvendo minerais, os níveis de exposição a esses radionuclídeos não são significativamente maiores do que os níveis normais de fundo, assim, essas exposições não trazem preocupação quanto a proteção radiológica. No entanto, certas atividades podem expor mais os seres humanos e necessitar um maior controle. O material que dá origem a essas exposições aumentadas tornou-se conhecido como material radioativo de ocorrência natural (NORM) (IAEA, 2018).

O termo *Naturally Occurring Radioactive Materials* (NORM) inclui todos os elementos radioativos encontrados no ambiente, porém, é utilizado para especificar materiais radioativos de ocorrência natural onde o potencial de exposição foi aumentado devido as atividades humanas. Caso essas atividades tenham aumentado a concentração de radionuclídeos devido ao uso de alguma tecnologia ou técnica, o termo *Technologically Enhanced NORM* (TENORM) é utilizado (WNA, 2020).

As radiações ionizantes, sejam elas provenientes de fontes naturais ou artificiais podem causar mutações em um indivíduo que podem resultar em um câncer. Essa relação tem maior probabilidade de acontecer quanto maiores as taxas de dose e dos valores das doses absorvidas (NOUAILHETAS, 2005). Assim, diminuir os níveis de exposição deve se esforço contínuo.

Realizar um mapeamento dos níveis de exposição em determinada área ajuda a garantir que determinado local é seguro. Esse mapeamento pode ser feito utilizando dosímetros, como uma câmara de ionização, além de simulações computacionais empregando o método Monte Carlo.

As simulações tratadas nesse estudo podem ser elaboradas por meio de diferentes softwares. Esses, permitem a criação espaços tridimensionais que simulam o cenário de exposição, incluindo objetos simuladores antropomórficos virtuais para representar os indivíduos. Além disso, através da caracterização de uma determinada fonte radioativa, vários tipos de radiações e diferentes níveis de energia podem ser simulados (ROGERS, 2006).

1.1 Contextualização do Problema

A revisão sistemática realizada por Fonseca (2009) fortaleceu a hipótese da relação entre a exposição ambiental e ocupacional a radiação ionizante com o perfil de mortalidade, como o câncer. Excluindo a mineração de urânio e todas as atividades do ciclo de combustível associadas, as indústrias conhecidas por terem problemas com NORM incluem:

- a) a indústria do carvão (mineração e combustão);
- b) a indústria de petróleo e gás (produção);
- c) mineração e fundição de metal;
- d) areias minerais (minerais de terras raras, titânio e zircônio);
- e) indústria de fertilizantes (fosfato);
- f) construção civil;
- g) reciclagem.

Outro problema do NORM está relacionado à exposição ao radônio em residências, especialmente aquelas construídas em solo granítico (WNA, 2020). Questões de saúde ocupacional incluem as seguintes exposições:

- a) tripulação de voo a níveis mais elevados de radiação cósmica;
- b) guias turísticos ao radônio em cavernas;
- c) mineiros ao radônio subterrâneo;
- d) trabalhadores nas indústrias de petróleo e gás e areias minerais.

1.2 Objetivos do trabalho

1.2.1 *Objetivo geral*

O objetivo desse trabalho é levantar as principais fontes de NORM no meio ambiente e determinar a dose recebida por uma pessoa na presença de fontes naturais de radiação.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Objetivos específicos a serem alcançados:

- a) explicitar as principais fontes de NORM no planeta contrapondo a realidade do Brasil;

- b) elaborar dois cenários de exposição a fontes de radiação natural, sendo elas a areia monazítica e uma rocha de urânio e tório através do código MCNP 6.2 (*Monte Carlo N-Particle*).

1.3 Relevância do trabalho

De acordo com o Instituto Nacional de Câncer (INCA), “câncer é um termo que abrange mais de 100 diferentes tipos de doenças malignas que têm em comum o crescimento desordenado de células, que podem invadir tecidos adjacentes ou órgãos a distância” (INCA, 2018a).

Há diversas causas para o câncer, dentre elas as externas, aquelas presentes no meio ambiente e causas internas, como hormônios e mutações genéticas. De acordo com o INCA, de 80% a 90% dos casos são associados a causas externas (INCA, 2018b).

Nesta dissertação buscou-se elaborar um modelo computacional para que possam ser realizadas simulações do impacto da radioatividade natural em seres humanos, utilizando características químicas e físicas das fontes de radiação já determinadas experimentalmente. Dessa forma, torna-se possível a simulação de diversos cenários de exposição a radioatividade sem a necessidade de se utilizar fontes ou de irradiar seres humanos ou animais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A lista de isótopos que contribuem para a radiação natural pode ser dividida entre os materiais provenientes do solo e os que são produzidos a partir da interação dos gases atmosféricos com os raios cósmicos (cosmogênicos) (WNA, 2020).

2.1 Radionuclídeos Naturais

O NORM terrestre consiste em material radioativo onde a atividade humana resulta em maior exposição radiológica. Os materiais podem ser elementos como urânio (^{238}U) e tório (^{232}Th) ou produtos de decaimento deles. As duas cadeias mais importantes que fornecem nuclídeos de relevância para o NORM são a série de tório, (Tabela 1), e a série de urânio, (Tabela 2). Os níveis de NORM são expressos normalmente de duas formas: becquerels por quilogramas (Bq/kg) ou becquerel por grama (Bq/g) indicando o nível de radioatividade geral ou de um isótopo em específico (WNA, 2020).

Tabela 1 – Séries naturais de decaimento radioativo do ^{232}Th

Elemento	Meia-vida	Desintegração	Energia (Mev)
^{232}Th	$1,39 \times 10^{10}$ anos	α	4,007
^{228}Ra	6,7 anos	β	0,040
^{228}Ac	6,13 horas	β	2,18
^{228}Th	1,91 anos	α	5,423
^{224}Ra	3,64 dias	α	5,681
^{220}Em	51,5 segundos	α	6,28
^{216}Po	0,16 segundos	α, β	6,774
^{212}Pb	10,6 horas	β	0,580
^{216}At	3×10^{-4} segundos	α	7,79
^{212}Bi	60,5 minutos	α	6,086
		β	2,25
^{212}Po		α	8,78
^{208}Tl		β	1,79
^{208}Pb		estável	

Fonte: Vasconcelos (2010).

O becquerel corresponde as unidades de desintegrações de uma fonte por segundo.

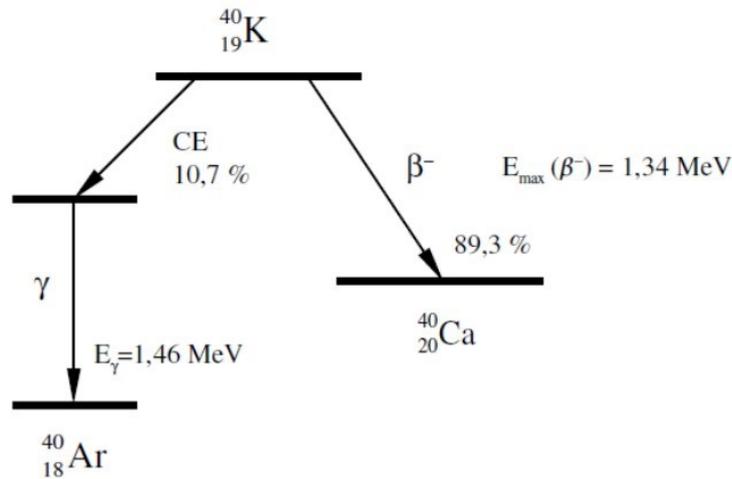
$$\text{Becquerel (Bq)} = s^{-1} \text{ no Sistema Internacional}$$

Tabela 2 – Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U

Elemento	Meia-vida	Desintegração	Energia (Mev)
^{238}U	4,5x10 ⁹ anos	α	4,2
^{234}Th	24,1 dias	β	0,19
^{234}Pa	1,18 minutos	β	2,32
	6,7 horas		1,13
^{234}U	2,5x10 ⁵ anos	α	4,768
^{230}Th	8x10 ⁴ anos	α	4,68
^{226}Ra	1620 anos	α	4,777
^{222}Rn	3,82 dias	α	5,486
^{218}Po	3,05 minutos	α	5,998
^{214}Pb	26,8 minutos	β	0,7
^{218}At	1,5-2 segundos	α	6,63
^{214}Bi	19,7 minutos	α	5,51
		β	3,71
^{214}Po	1,64x10 ⁻⁴ segundos	α	7,683
^{210}Ti	1,32 minutos	β	1,9
^{210}Pb	19,4 anos	β	0,017
^{210}Bi	5 dias	β	1,155
^{210}Po	138,3 dias	α	5,3
^{206}Tl	4,2 minutos	β	1,51
^{206}Pb		estável	

Fonte: Vasconcelos (2010).

Outra fonte importante de NORM terrestre é o potássio (^{40}K) e os produtos de seu decaimento, (Figura 1). Trata-se do sétimo elemento mais comum na crosta terrestre e pode ser encontrado em muitos alimentos como bananas, por exemplo. Humanos têm cerca de 65 Bq/kg de ^{40}K . Uma pessoa de 70 kg tem 4400 Bq de ^{40}K e 3.000 Bq de ^{14}C (WNA, 2020).

Figura 1 – Séries naturais de decaimento radioativo do ^{40}K 

Fonte: Lopes (2018).

2.2 Regulamentação da exposição à radiação

Em 1928 foi criada a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), órgão independente com membros voluntários, dividida em 4 comitês principais com as seguintes áreas de atuação:

- efeitos da radiação;
- doses por exposições à radiação;
- proteção radiológica na medicina;
- aplicação das recomendações da comissão.

Em 1957 foi criada a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), uma organização autônoma vinculada as Nações Unidas e que tem o intuito de promover o uso pacífico da energia nuclear. No Brasil a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), foi criada em 1956 e em 2005 publicou a CNEN-NN-3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, sendo atualizada em 2014 pela Resolução CNEN 164/2014. Esta norma é baseada nas recomendações da ICRP 60. Quanto a exposição externa à seres humanos, em 95% da população se dá entre 0,3 e 0,6 mSv/ano, sendo o limite máximo definido pela CNEN em 1 mSv/ano (SILVA, 2020).

2.3 Indústrias que produzem NORM

Nos próximos capítulos serão apresentadas indústrias que produzem NORM sem contar a mineração de urânio e todas as atividades que envolvidas na sua produção comercial.

2.3.1 *Mineração do carvão e usinas termelétricas movidas a carvão*

O carvão pode ser extraído em minas a céu aberto ou subterrâneas e produz quantidade significativa de estéril e água residual que podem apresentar níveis altos de radioatividade. As minas subterrâneas estão sujeitas a níveis elevados de ^{226}Ra e ^{228}Ra . Antes da adoção de novas tecnologias para a redução de emissões de resíduos de usinas termelétricas movidas a carvão, estas emitiam mais radioatividade no ambiente que usinas nucleares. Na China, estas usinas continuam sendo a maior fonte de radioatividade liberada no meio ambiente e contribuem significativamente para aumentar o NORM do país (WNA, 2020).

Nos EUA, 858 milhões de toneladas de carvão contendo na média 1,3 partes por milhão (ppm) de urânio e 3,2 ppm de tório foram utilizadas em 2013 para produzir eletricidade. Estima-se que para isso 1100 toneladas de urânio e 2700 toneladas de tório tenham sido liberadas junto as cinzas de carvão (WNA, 2020).

No Brasil, a primeira mina de carvão foi aberta em 1855 no Rio Grande do Sul, estado que detêm as maiores reservas nacionais. Em 1928 era inaugurada a usina térmica a carvão – Usina do Gasômetro – abastecida com carvão mineral transportado através do Guaíba até Porto Alegre. No início de sua operação não contava com filtros e a poluição por cinzas e particulados sob a cidade foi intensa até 1937, onde, para sanar o problema, foi construída uma chaminé de 117 metros de altura (ABCM, 2020).

Em 2019 a geração térmica por carvão no Brasil correspondeu por 3,7% da energia gerada no país. Considerando os países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a geração térmica provida pelo carvão correspondeu a 22,1% do total, sendo a segunda mais relevante, perdendo apenas para o gás natural, responsável por 29% (IEA, 2020).

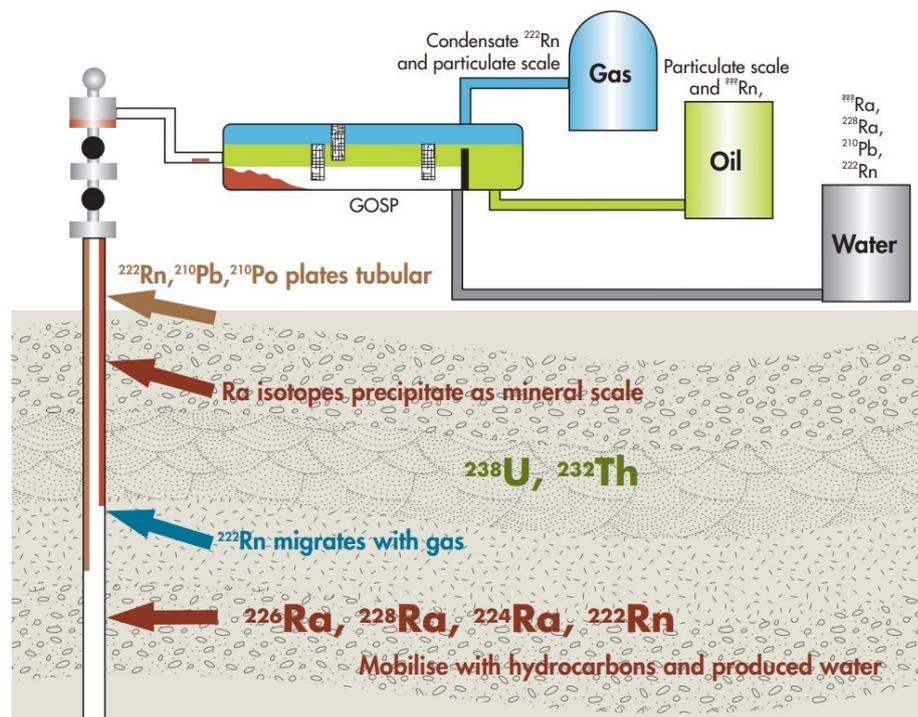
2.3.2 *Produção de óleo e gás*

O nível de radioatividade varia dependendo da composição rochosa do reservatório onde foi perfurado o poço, bem como da salinidade da água. Quanto maior a salinidade, mais NORM provavelmente será produzido. A salinidade frequentemente aumenta com a idade de um poço, assim, poços mais antigos tendem a exibir valores de NORM mais altos que poços mais novos. Isso representa um problema para trabalhadores principalmente durante manutenção, transporte e processamento de resíduos e descomissionamento. O NORM encontrado no processo de extração do petróleo é mostrado na figura 2. A exposição externa

devido a NORM é geralmente baixa o suficiente para não exigir medidas de proteção que garantam que os trabalhadores fiquem abaixo de seus limites de doses anuais (WNA, 2020).

Na década de 80, a Petrobras identificou a presença de radiação na borra de óleo de dutos e durante muitos anos teve que armazenar esses tubos devido à ausência de tecnologia para realizar a descontaminação. No início dos anos 2000, a empresa desenvolveu um processo para retirar o material com NORM dos tubos e armazená-lo em barris atendendo a normas determinadas pela CNEN. Apesar da situação dos resíduos de óleo com NORM dentro do país estar sob controle, ainda há necessidade de mais ferramentas que permitam identificar a origem exata dos resíduos (DE-PAULA-COSTA et al., 2018).

Figura 2 – Locais de acúmulo de NORM no processo de extração de petróleo



Fonte: OGP (2008).

2.3.3 Metais e fundição

A mineração e o processamento de minérios de metal, exceto o urânio, podem gerar grandes quantidades de resíduos NORM, dentre eles, rejeitos de minérios e fundição que podem conter altas concentrações de urânio, tório, rádio e os subprodutos de seus decaimentos. Um exemplo é a produção de estanho onde o rejeito de sua produção pode conter altos níveis de nióbio e tântalo, além de um nível elevado de radionuclídeos (WNA, 2020).

O tântalo geralmente ocorre com seu equivalente químico, o nióbio. Os minérios de tântalo compreendem uma grande variedade de mais de cem minerais, alguns dos quais contêm urânio e/ou tório. Embora não haja problemas nas plantas de processamento, os concentrados de tântalo enviados a clientes às vezes excedem o limite de radiação permitidos, exigindo documentação especial. Rejeitos de nióbio podem atingir níveis de radioatividade superiores a 100 kBq/kg. Os maiores produtores de tântalo são Austrália e África e a maior parte do nióbio vem do Brasil (WNA, 2020).

O Brasil detém 98,2% das reservas conhecidas de nióbio e é responsável por mais de 90% da produção mundial, sendo que a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), detém 80% da produção mundial (BRANCO, 2016). Estudos realizados na CBMM demonstram que os rejeitos de bário e os rejeitos metalúrgicos de sulfato são fontes potenciais de danos ambientais por conterem elementos radioativos (ALVES; DOS REIS COUTINHO, 2019), porém, não há informações precisas sobre os valores das emissões (DOLGANOVA et al., 2020).

2.3.4 *Terras raras*

Elementos de terras raras são quimicamente semelhantes ao urânio e tório e são frequentemente encontrados em conjunto com esses radionuclídeos. Trata-se de dezessete elementos químicos da tabela periódica e a maioria não são raros, no entanto, devido as suas propriedades geoquímicas se encontram dispersos e não costumam ser encontrados em formas concentradas e economicamente exploráveis. A produção de elementos de terras raras tem sido acompanhada pela produção de grandes volumes de hidróxido de tório e resíduos contendo chumbo e rádio. Na China, 30.000 toneladas de resíduos NORM dessa cadeia produtiva estão em armazenamento temporário (WNA, 2020).

O Brasil possui reservas expressivas de terras raras sendo uma delas a monazita, estando a mesma relacionada ao início da exploração das terras raras no país, na década de 1880, em Prado, na Bahia. Sua primeira aplicação foi na fabricação de mantas para lampiões a gás e até 1914, o Brasil foi o maior fornecedor mundial de monazita (SOUSA FILHO; GALAÇO; SERRA, 2019).

Na década de 40 o Brasil teve relevância na produção de terras raras com a empresa ORQUIMA e que na época foi o maior fornecedor de óxido de európio de alta pureza. Com o aumento do interesse do governo federal pela utilização do tório e urânio como combustível nuclear e tendo a monazita brasileira abundância nos elementos, o processamento da monazita

passa a ser responsabilidade da CNEN e em 1966, concluiu-se a estatização da ORQUIMA. Após diversas alterações de comando entre diferentes estatais ao longo dos anos, a produção de terras raras no Brasil se encerra em 1994 (SOUSA FILHO; GALAÇO; SERRA, 2019).

2.3.5 *Produção de fosfato e fertilizantes*

A rocha fosfática utilizada na produção de fertilizantes é uma das principais fontes de NORM devido ao urânio e tório. O fosfato é extraído principalmente de rochas de apatita e fosfato (fosforita), onde o urânio também pode estar concentrado nesses processos e a radioatividade desses minérios pode chegar a 10.000 Bq/kg, (WNA, 2020). Na tabela 3, tem-se a concentração média de radionuclídeos NORM em rochas fosfáticas nos países que são os maiores produtores mundiais.

A produção de ácido fosfórico, matéria prima para a produção de fertilizantes, requer primeiramente o beneficiamento do minério, seguido pela lixiviação ácida e separação. Em geral, a etapa de beneficiamento não resulta em redução de NORM do minério. O tratamento com ácido sulfúrico leva à produção de gesso (fosfogesso) que retém cerca de 80% de ^{226}Ra , 30% de ^{232}Th e 14% de ^{238}U . Nos EUA, o uso do fosfogesso com radioatividade superior a 370 Bq/kg é proibido pelas autoridades responsáveis. Resíduos de gesso podem ter níveis de radioatividade de até 1700 Bq/kg. (WNA, 2020). No Brasil, a CNEN autoriza a utilização de fosfogesso na mistura com o gesso comum em proporções que vão de 50 a 1000 Bq/kg para ^{226}Ra e de 50 a 400 Bq/kg para ^{228}Ra (CNEN, 2015).

Tabela 3 – Atividade dos radionuclídeos NORM em rochas fosfáticas

País	Urânio (Bq/kg)	Tório (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)
EUA	259-3700	3.7-22	1540	
EUA: Flórida	1500-1900	16-59	1800	
Brasil	114-880	204-753	330-700	350-1550
Chile	40	30	40	
Argélia	1295	56	1150	
Marrocos	1500-1700	10-200	1500-1700	
Senegal	1332	67	1370	
Tunísia	590	92	520	

País	Urânio (Bq/kg)	Tório (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)
Egito	1520	26	1370	
Jordânia	1300-1850			
Australia	15-900	4-47	28-90	

Fonte: WNA (2020).

A fabricação europeia de fertilizantes deu origem a descargas de gesso contendo cerca de 4 TBq/ano no Mar do Norte e no Atlântico Norte. Houve uma redução nessa quantidade na década de 90 e foi ultrapassada pela radioatividade da produção de petróleo e gás nas águas da Noruega e do Reino Unido, que libera mais de 10 TBq/ano. Juntas, essas fontes contribuem com 95% das emissões alfa nessas águas, duas ordens de magnitude a mais que a indústria nuclear (WNA, 2020).

No Brasil, mais de 80% da produção rocha fosfática e fosfato provém dos municípios de Tapira e Araxá, em Minas Gerais e de Catalão e Ouvidor, em Goiás. Apenas o município de Tapira detém 32,6% das reservas do Brasil (FONSECA, 2018). O minério é extraído nessa localidade pela mineradora Mosaic Fertilizantes onde é concentrado, transformado em polpa e enviado via mineroduto para ser processado em uma planta industrial da mesma empresa no município de Uberaba, Minas Gerais.

Como resultado do processo, 4.224.000 toneladas de fosfogesso foram produzidas em 2018 e nesse mesmo ano, a mineradora solicitou alteração no projeto de sua pilha de fosfogesso, já que a vida útil da mesma se encerrava em dezembro daquele ano, operando na cota de 145 metros e estocando 50 milhões de m³ do material. Obteve autorização para elevação da pilha, figura 2, até 185 metros, aumentando sua vida útil em 7 anos (SUPRAM TMAP, 2018). Na figura 3, tem-se as principais fontes de NORM na cidade de Araxá – MG e na figura 4, as principais fontes de NORM no Triângulo Mineiro.

Figura 3 – Planta industrial da Mosaic Fertilizantes em Uberaba – MG



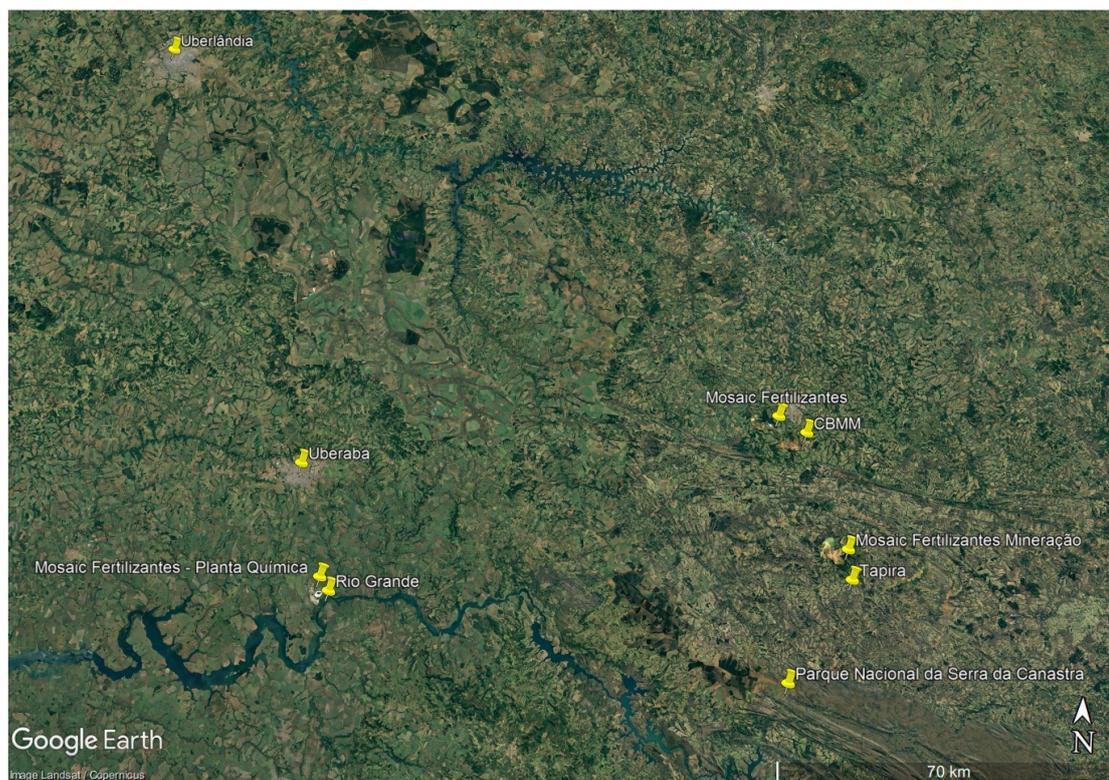
Fonte: Google Earth (2020).

Figura 4 – Fontes de NORM em Araxá - MG



Fonte: Google Earth (2020).

Figura 5 – Fontes de NORM no Triângulo Mineiro



Fonte: Google Earth (2020).

Apesar de haver impermeabilização do solo com argila, observou-se contaminação no lençol freático ao longo dos anos pela pilha de fosfógeno da Mosaic Fertilizantes (ARAÚJO; FERNANDES, 2013). Destaca-se a proximidade desse passivo ambiental com o Rio Grande, importante curso de água que tem usos múltiplos em seu trajeto: pesca, turismo, geração de energia além do fornecimento de água para população e indústria.

Em estudo realizado por Costa (2011) foi analisado o uso do fosfógeno produzido pelas principais produtoras de fosfato do país na construção civil. Foram construídos tijolos utilizando o material e na tabela 4, segue as concentrações médias de ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K e ^{210}Pb encontradas no fosfógeno de Uberaba.

Tabela 4 – Atividades médias de ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K e ^{210}Pb em tijolos produzidos com fosfógeno de Uberaba – MG

Concentração (Bq/kg)			
^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{210}Pb
294 ± 3	151 ± 6	<56	295 ± 16

Fonte: Costa (2011).

2.3.6 Materiais de construção

Materiais de construção podem conter níveis elevados de radionuclídeos, particularmente ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , sendo esses três a base para a formulação do *Activity Concentration Index* (ACI), um índice de concentração de atividade adotado em toda a Europa. Diretrizes para o uso de resíduos NORM na construção de edifícios foram desenvolvidas usando a abordagem ACI e os materiais são classificados em três categorias:

- abaixo de 0,5 mSv/ano: uso irrestrito;
- entre 0,5 e 1 mSv/ano: uso irrestrito em estradas, pontes, barragens e, com diluição, edifícios com baixa ocupação;
- acima de 1 mSv/ano: uso proibido.

Na tabela 5, temos a relação de alguns materiais de construção e suas atividades médias.

Tabela 5 – Materiais de construção e suas atividades (Bq/kg)

Material	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Concreto	1-250	1-190	5-1570
Concreto aerado	109818	<1-220	180-1600
Tijolos de argila	1-200	1-200	60-2000
Tijolos de cal e arenito	18415	10959	5-700
Construção com pedras naturais	1-500	1-310	767011
Gesso natural	<1-70	<1-100	7-280
Cimento	7-180	7-240	24-850
Azulejos	30-200	20-200	160-1410
Fosfogesso	4-700	19360	25-120
Rejeitos de alto forno	30-120	30-220	-

Fonte: WNA (2020).

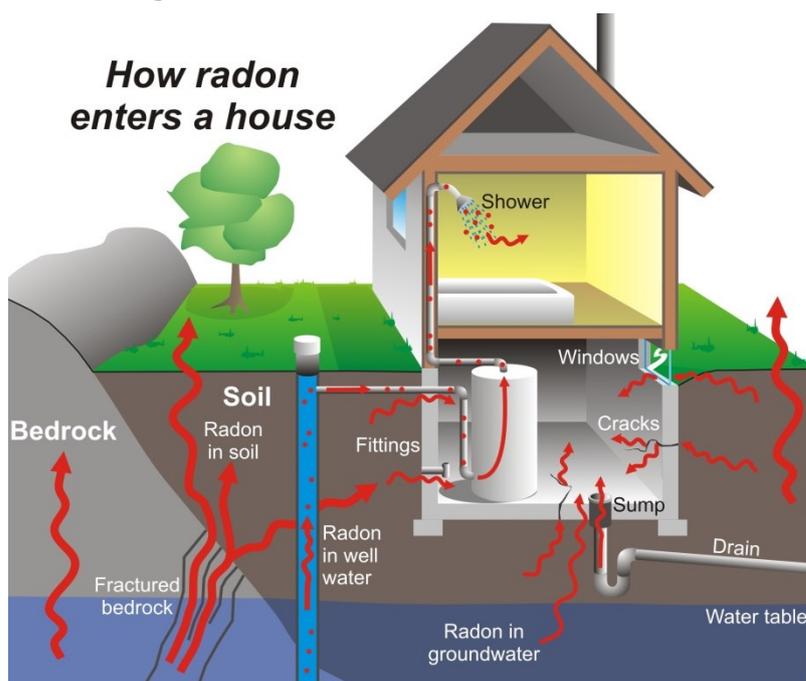
A União Europeia incentiva a utilização de resíduos NORM em materiais de construção, desde que a taxa de dose da exposição à raios gama seja inferior a 1 mSv/ano. As cinzas de carvão e os rejeitos de fundição são constituintes importantes dos materiais de construção na China. O granito, muito utilizado como revestimentos em edifícios e residências, pode conter níveis semelhantes de radiação aos de rejeitos de minas de urânio de baixo grau (WNA, 2020).

2.3.7 Radônio

O ^{226}Ra é um dos produtos de decomposição do ^{238}U e que é comum na maioria das rochas e solos. Quando decai, produz ^{222}Rn , um gás inerte com meia-vida de aproximadamente 4 dias. Por ter meia vida curta há uma grande probabilidade de sua decomposição ocorrer quando inalado, via decaimento alfa que são partículas perigosas para o pulmão. A exposição ao radônio corresponde à maior contribuição individual da radiação natural e podemos encontrá-lo até mesmo em nossa casa, como mostra a figura 6. O ICRP recomenda manter os níveis de radônio no local de trabalho abaixo de 300 Bq/m^3 , o que equivale a cerca de 10 mSv/ano (WNA, 2020).

De acordo com a CNEN-NN-4.01, o nível de referência para a concentração de radônio em minas subterrâneas é de 1000 Bq/m^3 e a partir desse patamar, medidas para mitigação são necessárias. Esse valor foi estabelecido em 2005 e antes disso, não havia nenhuma legislação a respeito. Em estudo realizado analisando os níveis de radônio em 40 minas subterrâneas no Brasil, verificou-se que 62,5% delas tem níveis de radônio que atendem a legislação brasileira (SILVA et al., 2018).

Figura 6 - Como o radônio entra na sua casa



Fonte: Interior Health (c2021).

2.4 Método Monte Carlo

O Método Monte Carlo emprega amostragem aleatória combinada com funções de probabilidade para descrever um fenômeno físico. Isso possibilita resolver problemas que seriam muito complexos ou até mesmo impossíveis de se resolver de outras formas. Na década de 40, cientistas nos laboratórios de Los Alamos começaram a utilizar o método recém criado por Stanislaw Ulam. Por estarem trabalhando em projetos secretos de armas nucleares, os cientistas deram o nome para o método de “Monte Carlo”, que se refere ao Casino Monte Carlo, em Mônaco (ECKHARDT; ULAM; VON NEUMANN, 1987). Nas décadas seguintes, diversos softwares foram produzidos em Los Alamos e na década de 70, foram todos reunidos criando um único ambiente de simulação, o MCNP.

2.5 Objetos simuladores antropomórficos virtuais

O desenvolvimento dos objetos simuladores antropomórficos virtuais começou há quase 60 anos e os primeiros estudos de transporte de radiação utilizaram objetos simuladores homogêneos semi-infinitos. No estudo de Alsmiller Jr e Moran (1968) utilizou-se placas semi-infinitas de 30 cm de água onde variava-se a espessura para diferentes cenários de simulação. Posteriormente, foram desenvolvidos cilindros elípticos homogêneos e depois com partes não homogêneas incorporadas para simular outros órgãos (CASSOLA et al., 2009).

Motivados pela ideia de projetar um modelo que se pareça com um ser humano real, os pesquisadores aproveitaram o progresso feito no desenvolvimento computacional e no processamento de imagens para melhorar continuamente a anatomia dos objetos simuladores virtuais. Os objetos feitos com voxel, baseados em tomografia computadorizada e ressonância magnética nuclear representam um passo importante para a concretização dessa ideia (CASSOLA et al., 2009).

Embora forneçam boas representações anatômicas do corpo humano, os objetos simuladores de voxel ainda têm suas limitações. Por exemplo, dependendo da resolução do voxel, pode ser difícil ou mesmo impossível segmentar corretamente certos tecidos, como as paredes do cólon ou do intestino delgado (CASSOLA et al., 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para definir os elementos da simulação foram escolhidos exemplos de materiais que contém NORM e que são facilmente encontrados no Brasil. Para realizar a simulação proposta nesse estudo foram utilizadas como exemplos a areia monazítica, que pode ser encontrada na região de Guarapari – ES e uma rocha de urânio e tório, comum na região de Poços de Caldas – MG.

3.1 Monte Carlo N-Particle

O software *Monte Carlo N-Particle* é desenvolvido e atualizado pelo laboratório de Los Alamos, EUA. O MCNP está na sua versão 6.2 e é internacionalmente reconhecido na análise do transporte de nêutrons e raios gama, sendo um software versátil e com uma extensa lista de aplicações que vão desde o projeto de reatores até nas aplicações de Física Médica, como terapia com prótons e nêutrons (WERNER, 2017). Foi a escolha natural para a realização desse trabalho, pois além de sua ampla faixa de aplicações, o grupo de pesquisas detém a licença para seu uso.

3.2 Composição química da rocha de urânio e tório e da areia monazítica

Para elaborar virtualmente as fontes de radiação são necessárias informações das composições químicas da areia e da rocha. As simulações apresentadas aqui utilizam os dados aferidos experimentalmente por Mânica (2019) relativos a areia e por Souza (2013) relativos a rocha de urânio e tório. Além disso, o foco principal é conseguir elaborar cenários de simulações que utilizem esses elementos e avaliar a exposição ocupacional a estes materiais.

3.2.1 Composição química da rocha de urânio e tório

Os valores utilizados para elaborar a fonte de urânio e tório, demonstrados na tabela 6, foram levantados por Souza (2013), a partir de estudos de amostras na mina Osamu Utsumi, localizada no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, sul de Minas Gerais. Trata-se da primeira mina de urânio do Brasil, com início das atividades na década de 1970 (SOUZA; SILVEIRA; PEREIRA, 2013).

Tabela 6 – Composição química da rocha urânio e tório de Poços de Caldas

Composição	Elementos	
Percentual (%)	SiO ₂	24,71
	Al ₂ O ₃	22,4
	K ₂ O	12,9
	FeO(tot)	12,52
	P ₂ O ₅	12,3
	TiO ₂	9,86
	Na ₂ O	1,52
	CaO	1,19
	S	6700
	Partes por milhão (ppm)	Zr
Zn		412,46
U		121,29
Th		80,4

Fonte: Souza (2013).

3.2.2 Composição química areia monazítica

Apesar de haver diversos estudos da composição da areia monazítica de Guarapari-ES, a maioria deles, ao apresentar os dados químicos da composição da areia, não mostra toda a composição, incluindo elementos traços. No MCNP 6.2 é necessário que a soma da composição dos materiais de determinado elemento da geometria seja próxima de 100%. No estudo de Mânica (2019), a análise realizada foi da areia da Praia de Areia Preta, Guarapari – ES. Na figura 5, temos uma foto mostrando as características que dão nome a praia. Na tabela 7, encontram-se os dados relativos à composição química da areia.

Tabela 7 – Composição da areia monazítica da Praia de Areia Preta, Guarapari – ES

Composição	Elementos		
Percentual (%)	Si	68,99	
	Al	6,89	
	Fe	5,89	
	Zr	4,72	
	K	3,54	
	Ca	3,35	
	Ti	2,41	
	Na	1,60	
	Cl	1,19	
	Mg	0,87	
	P	0,35	
	S	0,20	
	Partes por milhão (ppm)	⁴⁰ K	6290 ± 288
		²³² Th	445,55 ± 12
²³⁸ U		41,43 ± 1,43	

Fonte: Mânica (2019).

Figura 7– Praia de Areia Preta – Guarapari – ES



Fonte: ESBRASIL (2019).

3.3 Cálculo dos coeficientes de conversão de dose equivalente, dose efetiva e incertezas

Com os valores de saída do cartão *tally* F6 foi possível calcular os coeficientes de conversões de dose equivalente ($CC[H_T]$) e efetiva ($CC[E]$) conforme descrito na literatura (NEVES et al., 2020). Esses fatores de conversão permitem fazer uma conexão entre os valores simulados de dose pelo software e os valores de dose de cenários reais.

$$CC[H_T]_{\text{Masculino}} = w_R \times D_{\text{simulada}} / K_{\text{MC, simulação}} \quad (1)$$

$$CC[H_T]_{\text{Feminino}} = w_R \times D_{\text{simulada}} / K_{\text{MC, simulação}} \quad (2)$$

$$CC[E]_{\text{Masculino}} = \sum_T w_T CC[H_T] \quad (3)$$

$$CC[E]_{\text{Feminino}} = \sum_T w_T CC[H_T] \quad (4)$$

$$CC[E] = \frac{CC[E]_{\text{Masculino}} + CC[E]_{\text{Feminino}}}{2} \quad (5)$$

onde D_{simulada} é a dose absorvida nos órgãos e tecidos do simulador antropomórfico virtual, obtidos por meio do *tally* F6.

A dose equivalente num tecido ou num órgão, H_T , é o valor médio da dose absorvida sobre todo tecido ou órgão T , multiplicada pelo fator de ponderação da radiação w_R , definido pela ICRP 60 e incluído na norma CNEN-NN-3.01 (TAUHATA et al., 2014). $CC[H_T]_{\text{Masculino}}$ e $CC[H_T]_{\text{Feminino}}$ são os coeficientes de dose equivalente nos simuladores antropomórficos virtuais MASH3 e FASH3.

O kerma (*kinetic energy released per unit of mass*) é definido como “a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons incidentes em um material de massa dm ” (TAUHATA et al., 2014). $K_{\text{MC, simulação}}$ trata-se do valor de kerma obtido com a câmara de ionização simulada.

Para obter valores de dose absorvida seria necessário realizar medições experimentais do kerma do ar, o que não foi possível devido as restrições de acesso a UFU, devido a pandemia do COVID-19. Assim, poder-se-ia obter o fator de conversão (FC), razão entre $K_{\text{MC, simulação}}$ e $K_{\text{ar, mensurado}}$. O cálculo para $D_{\text{dose absorvida}}$ será:

$$FC = \frac{K_{ar, \text{ mensurado}}}{K_{MC, \text{ simulação}}} \quad (6)$$

$$D_{\text{dose absorvida}} = D_{\text{simulada}} \times FC \quad (7)$$

Os valores de w_T (*tissue weighting factor*) relevante ao tecido ou órgão T estão associados a radiosensibilidade do órgão à radiação e são definidos pela ICRP 60. Seus valores estão na Tabela 8 (TAUHATA et al., 2014). O coeficiente de conversão de dose efetiva, $CC[E]$, é a soma ponderada dos coeficientes de conversão de doses equivalentes de todos os tecidos e órgãos T do corpo.

Tabela 8 – Valores do fator de ponderação tecidual w_T definido na ICRP 60

Órgão ou tecido	Fator de ponderação tecidual w_T
Gônadas	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireoide	0,05
Pele	0,01
Superfície óssea	0,01
Restantes*	0,05

*cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, útero, pâncreas, vesícula, timo, adrenais e músculo

Fonte: Tauhata (2014).

3.4 Caracterização da geometria da simulação

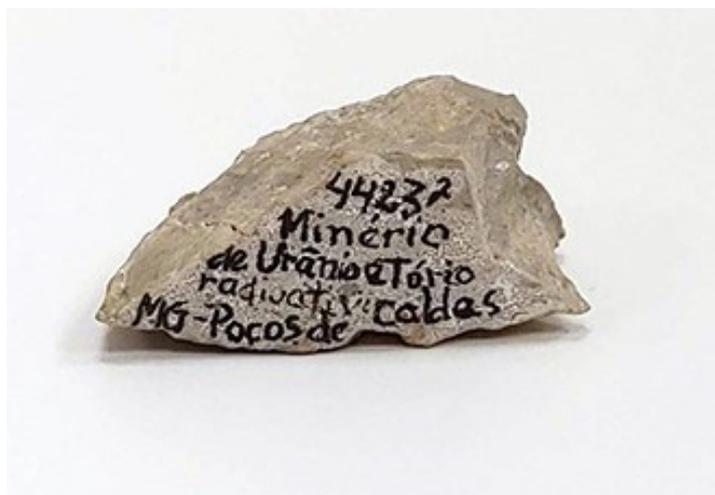
Para realizar as simulações foi construída no MCNP 6.2 uma sala com dimensões equivalentes ao Laboratório de Ensino em Física das Radiações (LERAD), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Mantendo apenas as estruturas relevantes à simulação, foram construídas uma mesa de madeira onde a fonte se apoia, parede e piso, onde a mesa tem

contato. As estruturas de alvenaria contêm argamassa baritada que tem por objetivo promover a proteção radiológica do ambiente. Foi incluído um objeto simulador antropomórfico virtual, que representa um pesquisador realizando medições utilizando as fontes.

Para simular a areia monazítica como fonte de radiação, levou-se em consideração a forma como são feitas as medições experimentais em laboratórios didáticos. Considerou-se a areia confinada em uma garrafa do tipo PET. Desta forma, construiu-se um cilindro com 5 cm de raio e 16 cm de altura, totalmente preenchido com areia monazítica. A geometria da rocha usada na simulação foi feita baseada em uma rocha de urânio e tório que se encontra no LERAD, figura 6.

Entre o objeto simulador antropomórfico virtual e a bancada, foi adicionada uma estrutura cilíndrica correspondente a uma câmara de ionização que tem a função de coletar dados para se calcular o kerma no ar. Dessa forma será possível calcular os valores do coeficiente de conversão de dose equivalente ($CC[H_T]$) e efetiva ($CC[E]$) do objeto simulador antropomórfico virtual. A câmara de ionização de referência para a construção da geometria é da marca Radcal, modelo 10x6-180, que está disponível no Laboratório de Instrumentação e Dosimetria (LInDa).

Figura 8 – Rocha de urânio e tório



Fonte: autoria própria (2020).

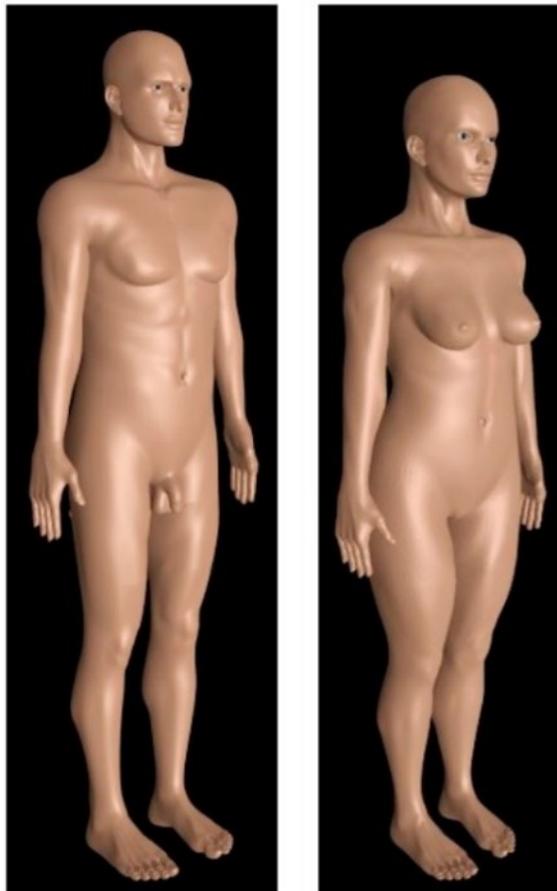
3.5 Objetos simuladores antropomórficos virtuais MASH3 e FASH3

Os objetos simuladores antropomórficos virtuais utilizados para realizar as simulações foram desenvolvidos pelo Grupo de Dosimetria e Instrumentação Nuclear do Departamento

de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE). Trata-se de um homem adulto mesh, MASH3 (*male adult meSH*), e uma mulher adulta mesh, FASH3 (*female adult meSH*), mostrados na figura 7. Eles representam de forma detalhada um homem e uma mulher e suas características fisiológicas e anatômicas satisfazem as recomendações do ICRP (CASSOLA et al., 2009).

Foram realizadas 4 simulações onde o MASH3 e FASH3 foram expostos a rocha de urânio e tório e areia monazítica separadamente. Em todas as situações eles estão a 58 cm do centro da fonte.

Figura 9 – Objeto simulador MASH3 e objeto simulador FASH3, da esquerda para a direita



Fonte: Kramer et al. (2009).

3.6 Arquivo de entrada do MCNP 6.2

O arquivo de entrada do MCNP é a forma utilizada para transmitir ao software as características da simulação. A seguir, são tratadas de forma detalhada as principais características e o processo de elaboração desse arquivo.

3.6.1 *Materiais*

Parte das especificações para se realizar uma simulação no MCNP 6.2 é determinar os materiais da geometria construída. Para isso, há uma parte específica do código destinada aos materiais para todas as células da geometria que contém determinado material m , que corresponde ao número do material. O valor de entrada que vem em seguida consiste do número de identificação (ZAID) do elemento ou nuclídeo seguido pela fração atômica, ou fração da massa atômica se inserido como um número negativo, daquele elemento ou nuclídeo, até todos os elementos e nuclídeos necessários para definir o material estiverem sido listados (WERNER, 2017).

3.6.2 *Identificador numérico do elemento ou nuclídeo (ZAID)*

Esse número é usado para identificar o elemento ou nuclídeo que forma o material. A forma do número é $ZZZAAA$, onde:

- a) ZZZ é o número atômico do elemento ou nuclídeo;
- b) AAA é número que representa a massa do nuclídeo, ignorado para análise de fótons e elétrons.

Como exemplo, $ZAID=74182$ representa o isótopo $^{182}_{74}W$ e $ZAID=74000$ representa o elemento tungstênio. Na simulação realizada serão analisados os fótons emitidos, assim, os materiais serão representados pelo número atômico seguindo de 000.

3.6.3 *Cálculo dos valores de entrada no cartão de materiais*

Para realizar os cálculos dos valores de entrada no cartão de especificação dos materiais foi necessário realizar conversões dos valores de concentração dos elementos químicos de partes por milhão (ppm) para porcentagem. A composição da rocha de urânio e tório é dada na forma de óxidos, sendo assim, é necessário calcular separadamente a porcentagem de cada elemento em relação ao total.

Os valores relativos à composição da rocha, segundo o estudo de Souza (2013) foram encontrados através da técnica de espectrometria, que forneceu os valores totais de urânio, tório e potássio. Já na análise de composição da areia monazítica, de acordo com o estudo de Mânica (2019), encontrou-se a concentração de radionuclídeos dos mesmos elementos, ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K .

Na tabela 10, tem-se o cálculo dos valores de entrada do MCNP 6.2 para a rocha de urânio e tório. Primeiramente, para cada óxido é necessário definir a massa atômica de cada elemento. Esses valores foram obtidos de duas formas: deu-se preferência ao *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling* (MCCONN et al., 2011) e para os elementos que não foram listados nesse, foi utilizada a tabela periódica do *National Institute of Standards and Thecnology* (NIST) (KRAMIDA; OLSEN; RALCHENKO, 2019).

Na primeira linha da Tabela 10, temos o elemento SiO_2 . A coluna “ZZZAAA” indica como os elementos serão representados no MCNP 6.2, através do seu número atômico. A massa atômica de Si é 28,085 e do O_2 , 31,998. A massa atômica total do elemento SiO_2 é 60,083. Fazendo uma regra de três, podemos afirmar que, percentualmente, o elemento Si corresponde a 53,26% da massa atômica total e o O_2 , a 46,74%, como consta na coluna “Massa atômica do elemento (%)”. O óxido SiO_2 corresponde a 24,71% da composição da rocha, como demonstrado na coluna “Concentração na rocha (%)”. Multiplicando suas proporções ($0,532565 \times 0,2471$) temos a proporção final de Si que será colocada no cartão material do MCNP 6.2, como consta na última coluna, representando a proporção daquele elemento na fonte mista de urânio e tório.

Por fim, a soma das frações da massa de cada elemento tem que ser aproximadamente 100%. No caso do oxigênio, como há outros elementos onde ele é presente, sua massa atômica contida em cada elemento é somada e temos no final a massa atômica total de oxigênio na areia ou na rocha. O mesmo cálculo foi efetuado para todos os outros elementos. Na tabela 9 temos os cálculos dos valores de entrada para a simulação do cenário utilizando areia monazítica.

Tabela 9 – Valores de entrada no MCNP 6.2 para definição dos elementos da rocha de urânio e tório

Elementos		ZZZAAA	Fração da massa atômica do elemento	Fração de concentração do elemento na rocha	Valor de entrada no MCNP
SiO ₂	Si	14000	0,532565	0,2471	-0,131596812
	O2	8000	0,467435	0,2471	-0,115503189
Al ₂ O ₃	Al	13000	0,470749	0,224	-0,105447776
	O3	8000	0,529251	0,224	-0,118552224
K ₂ O	K2	19000	0,169852	0,129	-0,021910908
	O	8000	0,830148	0,129	-0,107089092
FeO _(tot)	Fe	26000	0,222695	0,1252	-0,027881414
	O	8000	0,777305	0,1252	-0,097318586
P ₂ O ₅	P2	15000	0,563577	0,123	-0,069319971
	O5	8000	0,436423	0,123	-0,053680029
TiO ₂	Ti	22000	0,400592	0,0986	-0,039498371
	O2	8000	0,599408	0,0986	-0,059101629
Na ₂ O	Na	11000	0,258143	0,0152	-0,003923774
	O	8000	0,741857	0,0152	-0,011276226
CaO	Ca	20000	0,285299	0,0119	-0,003395058
	O	8000	0,714701	0,0119	-0,008504942
S		16000	1	0,0067	-0,0067
Zr		40000	1	0,00151479	-0,00151479
Zn		30000	1	0,00041246	-0,00041246
U		92000	1	0,00012129	-0,00012129
Th		90000	1	0,0000804	-0,0000804
					-0,99999994

Fonte: autoria própria (2020).

Tabela 10 – Valores de entrada no MCNP 6.2 para definição dos elementos da areia monazítica

Elemento	ZZZAAA	Fração da massa atômica do elemento	Fração de concentração na areia	Valor de entrada no MCNP
<i>Si</i>	14000	1	0,68985	-0,68985
<i>Al</i>	13000	1	0,068881	-0,068881
<i>Fe</i>	26000	1	0,058917	-0,058917
<i>Zr</i>	40000	1	0,047204	-0,047204
<i>K</i>	19000	1	0,035417	-0,035417
<i>Ca</i>	20000	1	0,033456	-0,033456
<i>Ti</i>	22000	1	0,024144	-0,024144
<i>Na</i>	11000	1	0,016019	-0,016019
<i>Cl</i>	17000	1	0,011923	-0,011923
<i>Mg</i>	12000	1	0,008669	-0,008669
<i>P</i>	15000	1	0,003492	-0,003492
<i>S</i>	16000	1	0,002028	-0,002028
⁴⁰ <i>K</i>	19000	1	0,00629	-0,00629
²³² <i>Th</i>	90000	1	0,00044555	-0,00044555
²³⁸ <i>U</i>	92000	1	0,00004143	-
				0,00004112917677
				-1,00677698

Fonte: autoria própria (2020).

3.6.4 Determinação dos materiais da bancada e da estrutura civil da sala

A definição dos materiais da bancada e da estrutura civil da sala foi baseada no *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling* (MCCONN et al., 2011). Como seria trabalhoso determinar exatamente a composição de cada um dos elementos que compõe esses objetos e estruturas, utilizar os valores tabelados oferece uma aproximação razoável e que tornam o trabalho exequível. Para os dados de material da bancada foi considerado o item *wood (southern pine)* e para a parede e piso o *concrete, barite*. Abaixo é apresentado o cartão de dados dos materiais do MCNP 6.2 para a rocha de urânio e tório.

3.6.5 Fonte radioativa

Para realizar a simulação é necessário determinar no arquivo de entrada do MCNP 6.2 a probabilidade dos eventos de decaimento dos radionuclídeos relevantes. Para isso, utilizou-se o estudo feito por Galford (2017a) onde foram determinadas as funções de densidade de probabilidade das cadeias de decaimento de tório e urânio. Para simular uma fonte mista composta de potássio, tório e urânio as distribuições de probabilidade dos elementos são amostrados de acordo com as atividades específicas dos fótons e a sua concentração.

Para o ^{40}K , os raios gama surgem da desintegração do isótopo, resultando em raios gama de 1,46 MeV. Para os elementos de ^{238}U e ^{232}Th os raios gama se originam de séries de decaimento complexas, como mostrado nas Tabelas 1 e 2. Aproximadamente 362 emissões de fótons, excluindo raio-x, são produzidas por isótopos na série de decaimento do ^{232}Th e 898 emissões ocorrem para a série de ^{238}U , de acordo com a Tabela de Isótopos Radioativos (CHU; EKSTRÖM; FIRESTONE, 1999).

Estudos tem mostrado que uma boa fidelidade nos resultados pode ser alcançada se as emissões menores que 180 keV, que compreendem menos de 0,4% do total de emissões, forem desconsideradas, melhorando a eficiência computacional sem prejuízo aos resultados. Para algumas aplicações mostrou-se que 40 energias de fótons entre 209 e 2614 keV simulam adequadamente a série de ^{232}Th para campos de petróleo e da mesma forma, 30 energia de fótons entre 186 e 2448 keV para o ^{238}U , dentro de todas as emissões de fótons (GALFORD, 2017b).

De acordo com Galford (2017a), com base nos valores de emissões de raios gama obtidos da Tabela de Isótopos Radioativos para as séries de decaimento naturais de ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th os valores calculados das atividades específicas dos fótons de raios gama para esses elementos são: 3,41 fótons/g.seg, 10582,4348 fótons/g.seg e 28115,737 fótons/g.seg.

Na tabela 11 temos a contribuição de cada elemento para a atividade total de fótons de cada fonte: 4,700875499 fótons/seg.g para a rocha de urânio e tório e 5,901287709 fótons/seg.g para a areia monazítica.

Tabela 11– Cálculo da frequência de amostragem

Elemento	Atividade específica ($\frac{\text{fótons}}{\text{seg.g}}$)	Concentração	Atividade total ($\frac{\text{fótons}}{\text{seg.g}}$)	MCNP Frequência de amostragem
Rocha de urânio e tório				
⁴⁰ K	3,41	0,129 %	0,43989	0,093576186
²³² Th	10582,4348	80,4 ppm	0,850827758	0,180993468
²³⁸ U	28115,737	121,29 ppm	3,410157741	0,725430346
			4,700875499	1
Areia monazítica				
⁴⁰ K	3,41	6290 ppm	0,0214489	0,003634614
²³² Th	10582,4348	445,55 ppm	4,715003825	0,798978809
²³⁸ U	28115,737	41,43 ppm	1,164834984	0,197386578
			5,901287709	1

Fonte: autoria própria (2020).

A distribuição de probabilidade da fonte mista é obtida quando as contribuições das atividades individuais dos fótons são normalizadas em relação a atividade total dos fótons. O valor correspondente a frequência de amostragem a ser colocada no cartão de entrada do MCNP 6.2 será calculado a partir dessa normalização, pois a soma das probabilidades tem que ser 100%, indicado pelo valor um (1) na última coluna.

Assim, durante 9,35 % do tempo, os 1,46 MeV dos raios gama do potássio serão amostrados pela simulação. Abaixo, estão os valores de probabilidades de emissão inseridos no código do MCNP 6.2.

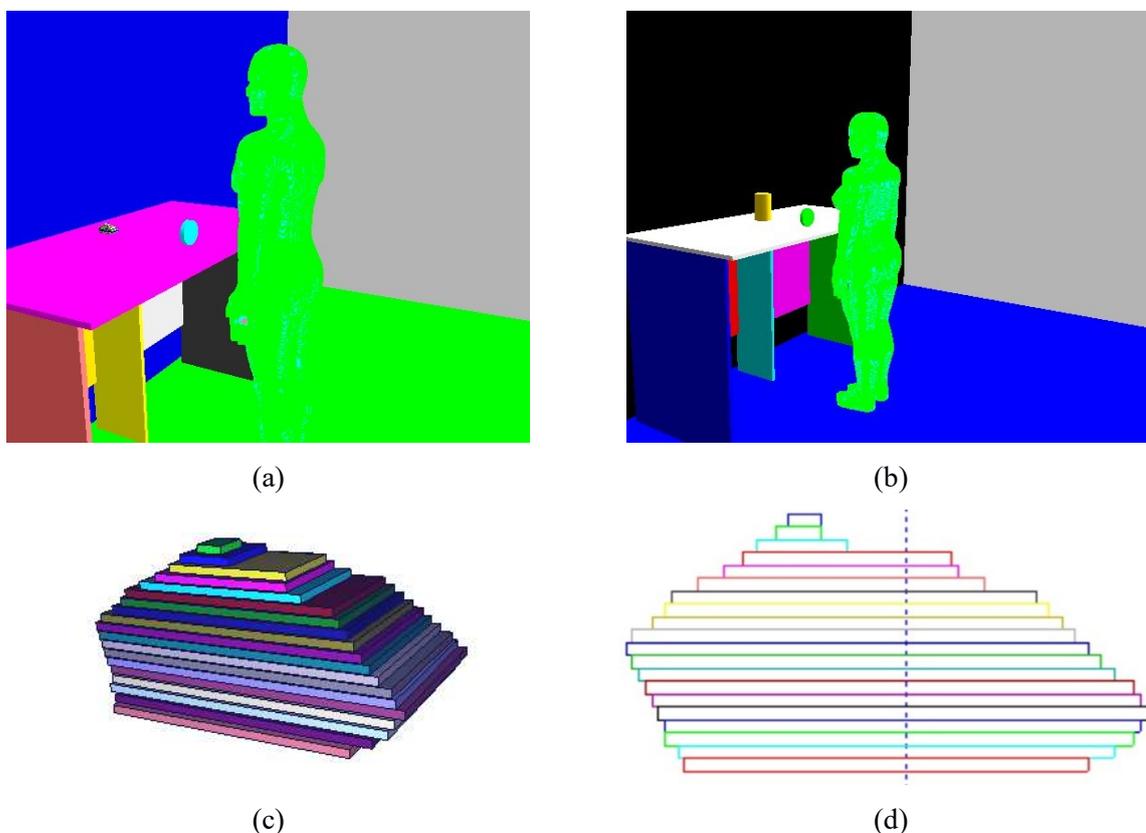
3.6.6 Especificação dos tallys

Os *tallys* são utilizados para especificar quais dados devem ser extraídos da simulação realizada no MCNP 6.2. Eles são identificados pelo tipo de registro a ser feito e pelo tipo de partícula (WERNER, 2017). Para as simulações dessa dissertação foi escolhido o *tally* F6 (MeV/g/source-particle), para calcular quantidade de energia depositada nos órgãos e tecidos do objeto simulador antropomórfico virtual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas figuras 10(a) e (b) são apresentados dois cenários de simulação representando uma pessoa numa prática de laboratório onde o piso e as paredes são de argamassa baritada. Na figura 10(a) é possível visualizar o objeto simulador MASH3 de frente para a bancada e sob ela, a rocha de urânio e tório, e na figura 10(b), o objeto simulador FASH3 de frente para a bancada e sob ela, um cilindro contendo areia monazítica. Entre a fonte e o objeto simulador antropomórfico virtual, a estrutura cilíndrica corresponde a câmara de ionização. A rocha de urânio e tório retratada na figura 8 foi construída de forma a representar uma estrutura semelhante a uma rocha de urânio e tório real, como a mostrada nas figuras 10(c) e (d). É composta de 19 paralelepípedos empilhados de diferentes tamanhos.

Figura 10 – Ambiente simplificado do LERAD, MASH3 e a rocha de urânio e tório sob a bancada (a); FASH3 e garrafa contendo areia monazítica sob a bancada (b); detalhe da geometria da rocha de urânio e tório (c); (d) corte transversal da rocha de urânio e tório



Fonte: autoria própria (2020).

A seguir, é apresentada parte do código elaborado correspondente a determinação dos materiais constituintes dos cenários de simulação.

C FONTE RADIOATIVA: ROCHA DE URANIO E TORIO

M1 1000. -0.059642 \$Wood (Southern Pine)
6000. -0.497018
7000. -0.00497
8000. -0.427435
12000. -0.001988
16000. -0.00497
19000. -0.001988
20000. -0.001988

M2 8000. -0.420145083 \$Rocha de uranio e torio
14000. -0.115503189
13000. -0.118552224
15000. -0.053680029
19000. -0.107089092
22000. -0.059101629
26000. -0.097318586
11000. -0.011276226
20000. -0.008504942
40000. -0.00151479
90000. -0.0000804
16000. -0.0067
30000. -0.00041246
92000. -0,00000000691353
92000. -0,00000087377316
92000. -0,000120409

M3 1000. -0.003585 \$Concrete, Barite (Type BA)
8000. -0.311622
12000. -0.001195
13000. -0.004183
14000. -0.010457
16000. -0.107858
20000. -0.050194
26000. -0.047505

56000. -0.4634

C FONTE RADIOATIVA: AREIA MONAZITICA

M1 1000. -0.059642 \$Wood (Southern Pine)

6000. -0.497018

7000. -0.00497

8000. -0.427435

12000. -0.001988

16000. -0.00497

19000. -0.001988

20000. -0.001988

M2 8000 -0. \$Areia monazitica

11000 -0.016019

12000 -0.008669

13000 -0.068881

14000 -0.68985

15000 -0.003492

16000 -0.002028

17000 -0.011923

19000 -0.041707

20000 -0.033456

22000 -0.024144

26000 -0.058917

40000 -0.047204

90000 -0.00044555

92000 -0,00000000236151

92000 -0,0000002984617200

92000 -0,0000411291767700

M3 1000. -0.003585 \$Concrete. Barite (Type BA)

8000. -0.311622

12000. -0.001195

13000. -0.004183

14000. -0.010457

16000. -0.107858

20000. -0.050194

26000. -0.047505

56000. -0.4634

Também é apresentada parte do código correspondente a frequência de amostragem para a areia monazítica e para a rocha de urânio e tório.

c Probabilidade de emissão de cada decaimento - 445,55 ppm Th,
41,43 ppm U, 6290 ppm K - areia monazítica

si4 s 5 6 7

sp4 0.798979 0.197387 0.003635

c Probabilidade de emissão de cada decaimento - 80,4 ppm Th,
121,29 ppm U, 0,129% K - rocha de urânio e tório

si4 s 5 6 7

sp4 0.180993468 0.725430346 0.093576186

Os resultados demonstrados nas Tabelas 12 e 13 mostram as estimativas dos coeficientes de conversões de dose equivalente $CC[H_T]$ e efetiva $CC[E]$ do FASH3 e do MASH3 expostos a areia monazítica e a rocha de urânio e tório. As incertezas estão relacionadas com o número de histórias que ocorrem em determinado tecido/órgão. Histórias são os ciclos de análise de transporte das cargas. Inicialmente uma partícula é “criada” com uma energia E disponível na lista de energias inseridas com uma localização e direção inicial. Na fase de transporte, para cada iteração, uma nova direção é amostrada juntamente com a energia restante. Esse processo é repetido até toda energia ser depositada (HENDRIKS; MAUČEC; DE MEIJER, 2002). Para o FASH3, as gônadas apresentaram a maior incerteza e para o MASH3 o órgão que apresentou a maior incerteza foi a tireoide.

Na Tabela 12, considerando o cenário onde o FASH3 está exposto à garrafa contendo areia monazítica, observa-se que o órgão com maiores valores de $CC[H_T]$ são as mamas. A dose que ele recebe corresponde a 13,99% da dose total recebida. Na sequência, os órgãos que a dose foi mais significativa foram estômago e fígado, responsáveis respectivamente por 10,82% e 10,36% da dose total recebida. No cenário onde está exposta a rocha de urânio e tório os órgãos que receberam a maior dose foram as mamas, sendo responsáveis por 14,37% da dose recebida. Os órgãos com maiores valores de $CC[H_T]$ nesse cenário também foram

estômago e fígado, responsáveis por 11,04% e 10,68% da dose recebida. Verifica-se que a tireoide apresenta valor bem próximo, sendo responsável por 10,62% nessa situação.

Tabela 12 – CC[H_T] e CC[E] para o objeto simulador antropomórfico feminino FASH3

Órgãos	CC[H _T] (μSv/Gy)			
	Areia	Incerteza	Rocha	Incerteza
Medula óssea	9,05E-02	0,07%	1,08E-01	0,07%
Cólon	2,07E-01	0,11%	2,08E-01	0,11%
Pulmão	2,02E-01	0,08%	2,37E-01	0,08%
Estômago	2,73E-01	0,13%	3,10E-01	0,13%
Mamas	3,52E-01	0,10%	4,03E-01	0,10%
Demais Tecidos*	8,03E-04	0,07%	9,34E-04	0,07%
Gônadas	1,49E-01	0,51%	1,70E-01	0,51%
Bexiga	1,52E-01	0,33%	1,78E-01	0,33%
Esôfago	1,92E-01	0,22%	2,25E-01	0,22%
Fígado	2,61E-01	0,10%	3,00E-01	0,10%
Tireoide	2,47E-01	0,33%	2,98E-01	0,33%
Superfície óssea	3,10E-02	0,07%	3,65E-02	0,07%
Cérebro	1,19E-01	0,14%	1,51E-01	0,14%
Glândulas salivares	6,90E-02	0,24%	8,52E-02	0,24%
Pele	1,72E-01	0,07%	2,05E-01	0,07%
CC[E] (μSv)	2,52E+00	2,55%	2,81E+00	2,49%

* Glândulas suprarrenais, região extratorácica, parede da vesícula biliar, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, parede do intestino delgado, baço, timo, testículo e coração.

Fonte: autoria própria (2020).

Tabela 13 – CC[H_T] e CC[E] para o objeto simulador antropomórfico masculino MASH3

Órgãos	CC[H _T] (μSv/Gy)			
	Areia	Incerteza	Rocha	Incerteza
Medula óssea	8,67E-02	0,07%	1,04E-01	0,07%
Cólon	2,26E-01	0,10%	2,47E-01	0,11%
Pulmão	1,91E-01	0,08%	2,28E-01	0,08%
Estômago	2,77E-01	0,13%	3,17E-01	0,13%
Mamas	3,42E-01	0,22%	3,95E-01	0,22%
Demais Tecidos*	9,31E-04	0,06%	1,10E-03	0,06%
Gônadas	2,12E-01	0,30%	2,46E-01	0,30%
Bexiga	1,39E-01	0,26%	1,38E-01	0,29%
Esôfago	1,57E-01	0,23%	1,87E-01	0,23%
Fígado	2,61E-01	0,09%	3,04E-01	0,09%
Tireoide	2,02E-01	0,35%	2,49E-01	0,35%
Superfície óssea	3,00E-02	0,07%	3,56E-02	0,07%
Cérebro	9,35E-02	0,15%	1,24E-01	0,14%
Glândulas salivares	6,18E-02	0,23%	7,91E-02	0,22%
Pele	1,61E-01	0,06%	1,93E-01	0,06%
CC[E] (μSv)	2,44E+00	2,39%	2,85E+00	2,41%

* Glândulas suprarrenais, região extratorácica, parede da vesícula biliar, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, parede do intestino delgado, baço, timo, testículo e coração.

Fonte: autoria própria, (2020).

Na Tabela 13, para o MASH3, o órgão com maior valor de $CC[H_T]$ no cenário com a areia monazítica foram as mamas, responsáveis por 14,02% da dose recebida. Os outros dois órgãos com maiores valores de $CC[H_T]$ também foram estômago e fígado, responsáveis por 11,34% e 10,68% da dose recebida. No cenário com a rocha de urânio e tório, as mamas foram responsáveis por 13,87%. Em seguida, estômago e fígado com 11,14% e 10,67%. Observa-se nos resultados que as mamas, para ambos os gêneros, se trata do órgão com maior valor de $CC[H_T]$.

Na Tabela 14 verifica-se que o cenário onde ocorre a maior dose é para o MASH3 quando exposto a rocha. Nos cenários onde MASH3 e FASH3 são expostos a areia, o FASH3 é quem recebe a maior dose. Os dois objetos simuladores antropomórficos virtuais receberam maior dose na presença da rocha em comparação com a areia monazítica. Verifica-se que apesar de ser bem menor em volume que a garrafa contendo areia monazítica, a rocha de urânio e tório tem uma atividade maior pois os objetos simuladores apresentam $CC[E]$ maior. O FASH3 possui um $CC[E]$ 11,51% maior na presença da rocha, em relação a areia e o MASH3 possui um $CC[E]$ 16,80% maior.

Tabela 14 – $CC[E]$ para os quatro cenários simulados

Cenários simulados	$CC[E]$ ($\mu\text{Sv/Gy}$)	Incerteza (%)
MASH3 – rocha	2,85E+00	2,41%
MASH3 – areia	2,44E+00	2,39%
FASH3 – rocha	2,81E+00	2,49%
FASH3 – areia	2,52E+00	2,55%

Fonte: autoria própria, (2020)

Na Tabela 15, se observa que enquanto para o FASH3 o quarto órgão com maior valor de $CC[H_T]$ é a tireoide, para o MASH3 se trata do cólon quando expostos a areia monazítica. Quando expostos a rocha de urânio e tório, o quarto órgão com maior valor de $CC[H_T]$ para o MASH3 e FASH3 é a tireoide.

Para órgãos maiores há uma tendência de a incerteza ser menor, pois, nessa região maior haverá mais interações de partículas. Havendo mais interações, em relação a todo cenário, a incerteza será menor. Na Tabela 15 observa-se que para o FASH3 a tireoide é o órgão com maior valor de incerteza em todos os cenários, dentre os quatro com maior valor de $CC[H_T]$. Para o MASH3, dentre os 4 órgãos com maior valor de $CC[H_T]$, no cenário em que

está exposto a areia, a mama tem maior valor de incerteza. No cenário onde está exposto a rocha, a tireoide tem maior valor de incerteza.

Tabela 15– Órgãos com maior valor de CC[H_T] para os cenários simulados

Cenários	Órgão	CC[H _T] ($\mu\text{Sv/Gy}$)	Incerteza (%)	CC[E] ($\mu\text{Sv/Gy}$)	Incerteza (%)
FASH3 – areia	Todos			2,85E+00	2,41%
	Mama	3,52E-01	0,10%		
	Estomago	2,73E-01	0,13%		
	Fígado	2,61E-01	0,10%		
	Tireoide	2,47E-01	0,33%		
FASH3 – rocha	Todos			2,44E+00	2,39%
	Mama	4,03E-01	0,10%		
	Estomago	3,10E-01	0,13%		
	Fígado	3,00E-01	0,10%		
	Tireoide	2,98E-01	0,33%		
MASH3 – areia	Todos			2,81E+00	2,49%
	Mama	3,42E-01	0,22%		
	Estomago	2,77E-01	0,13%		
	Fígado	2,61E-01	0,09%		
	Cólon	2,26E-01	0,10%		
MASH3 – rocha	Todos			2,52E+00	2,55%
	Mama	3,95E-01	0,22%		
	Estomago	3,17E-01	0,13%		
	Fígado	3,04E-01	0,09%		
	Tireoide	2,49E-01	0,35%		

Fonte: autoria própria, (2020)

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi utilizado método Monte Carlo para realizar uma simulação computacional como estratégia para mapeamento de NORM. Foram simulados cenários nos quais seres humanos são expostos a areia monazítica e uma rocha de urânio e tório considerando a realidade de alunos, professores e técnicos de laboratório da UFU. Os cenários demonstrados foram modificados para simular diferentes situações em que há exposição a NORM. Assim, pode-se realizar um mapeamento do local de interesse e verificar os efeitos dessa exposição em seres humanos, de forma segura e econômica.

Dentre as possibilidades previstas na realização de mapeamento, todas as indústrias que geram NORM podem ter as situações e cenários onde acontece maior exposição à radiação estudadas virtualmente antes de serem propostas soluções e haver investimentos em proteção radiológica. Como foi demonstrado no trabalho, existe a flexibilidade para se alterar composição e formatos da fonte de radiação, do cenário e de incluir mais simuladores antropomórficos virtuais. Em trabalhos futuros sugere-se colocar proteções como anteparos plumbífero e verificar os efeitos na dose recebida. Nos setores sujeitos a NORM, esse procedimento pode ser feito antes de se realizar qualquer investimento e assim, verificar qual decisão realmente é a mais efetiva.

A simulação computacional utilizando o MCNP 6.2 atendeu aos objetivos iniciais do trabalho que era determinar a dose recebida por uma pessoa exposta a uma fonte de radiação natural. Analisando os resultados da simulação, verificou-se que o órgão com maior valor de $CC[H_T]$ é a mama, para ambos os objetos simuladores. Em seguida tem-se estômago e fígado como os maiores valores de $CC[H_T]$. Ambos os objetos simuladores apresentaram maiores valores de $CC[H_T]$ quando expostos a rocha em comparação com a areia monazítica.

Mesmo simulando fontes de baixa energia, foi possível verificar com detalhes as diferentes doses para cada simulador antropomórfico virtual exposto a cada tipo de fonte. A simulação não elimina o monitoramento ambiental para verificar se os níveis de radiação estão condizentes com as normas vigentes, porém, é uma ferramenta que pode auxiliar no entendimento do efeito da NORM nas pessoas que estão expostas e ajudar no desenvolvimento de soluções para diminuir a dose recebida.

Áreas do conhecimento como a Radioecologia, que busca a solução de problemas ambientais relacionados ao setor nuclear, são setores onde esse estudo pode ser aplicado, já que busca assimilar metodologias para melhor entendimento dos processos que modulam a radioatividade ambiental. Como demonstrado no trabalho, diversas atividades industriais

geram grande impacto no aumento do NORM, assim, técnicas como demonstrada nesse estudo podem auxiliar na avaliação de impactos ambientais e ações de recuperação ambiental. Esse ponto se torna relevante, já que como foi citado anteriormente, 80 a 90% dos casos de câncer estão associados a causas externas.

REFERÊNCIAS

- ABCM. História do Carvão no Brasil. **Carvão Mineral**, 2020. Disponível em: https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=8&i_area=4. Acesso em: 3 jan. 2021.
- ALSMILLER JR, R. G.; MORAN, H. S. Dose rate from high-energy electrons and photons. **Nuclear Instruments and Methods**, [S. l.], v. 58, n. 2, p. 343–344, 1968. DOI 10.2172/4499579.
- ALVES, A. R.; COUTINHO, A dos Reis. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. **Minerals Engineering**, [S. l.], v. 132, p. 275–283, 2019. DOI 10.1016/j.mineng.2018.11.041.
- ARAÚJO, A. P. B. de; FERNANDES, A. L. T. O passivo ambiental do fosfogesso gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados e as possibilidades de aproveitamento. **Enciclopédia biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 2952-2965, 2013.
- BRANCO, P. de M. Nióbio Brasileiro - Serviço Geológico Brasileiro. **CRPM**, 2016. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Niobio-Brasileiro-2616.html>. Acesso em: 3 jan. 2021.
- CASSOLA, V. F. *et al.* Fash and mash: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: i. development of the anatomy. **Physics in Medicine and Biology**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 133–162, 2009. DOI 10.1088/0031-9155/55/1/009.
- CHU, S. Y. F.; EKSTRÖM, L. P.; FIRESTONE, R. B. **Www table of radioactive isotopes, database version 1999-02-28**. [S. l.: s. n.], 1999.
- CNEN. Resolução CNEN 189/15 - Nível de dispensa para o uso de fosfogesso na construção civil. **Comissão Nacional de Energia Nuclear**, [S. l.], 2015. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm489.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.
- COSTA, L. J. P. da. **Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências**. 2011. Dissertação (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 65 f. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-03042012-135433/publico/2011CostaEstudo.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2020. DOI 10.11606/D.85.2011.tde-03042012-135433.
- DE-PAULA-COSTA, G. T. *et al.* Geochemical signature of NORM waste in Brazilian oil and gas industry. **Journal of environmental radioactivity**, [S. l.], v. 189, p. 202–206, 2018. DOI 10.1016/j.jenvrad.2018.04.014.
- DOLGANOVA, I. *et al.* Life cycle assessment of ferro niobium. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 611–619, 2020. DOI 10.1007/s11367-019-01714-7.
- ECKHARDT, R.; ULAM, S.; VON NEUMANN, J. The Monte Carlo method. **Los Alamos Science**, [S. l.], n. 15, p. 131, 1987.

FONSECA, A. S. A. **Exposição crônica a radiação ionizante: realidade ou fantasia. A construção de um protocolo para avaliação.** 2009. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2009. 154 f. Disponível em: https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/icict/2375/1/ENSP_Disserta%c3%a7%c3%a3o_Fonsec_a_Antonio_Sergio_Almeida.pdf. Acesso em: 3 jan. 2021.

FONSECA, D. S. Fosfato. **ANM**, [S. l.], 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/fosfato_sm_2018/view.

GALFORD, J. E. A Monte Carlo modeling alternative for the API Gamma Ray Calibration Facility. **Applied Radiation and Isotopes**, [S. l.], v. 122, p. 47–56, 2017a. DOI 10.1016/j.apradiso.2017.01.004.

GALFORD, J. E. **Api unit calibration of gamma ray logging tools using simulated data.** WO2017069865A1. Depósito: 22 out. 2015. Concessão: 27 abr. 2017b. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/WO2017069865A1/en>. Acesso em: 10 jan. 2021.

GOOGLE EARTH. [Foto de tela]. **Google Earth**, 2020.

HENDRIKS, P.; MAUČEC, M.; DE MEIJER, R. J. MCNP modelling of scintillation-detector γ -ray spectra from natural radionuclides. **Applied Radiation and Isotopes**, [S. l.], v. 57, n. 3, p. 449–457, 2002. DOI 10.1016/s0969-8043(02)00118-5.

INTERIOR HEALTH. How does radon get into my house?. **Interior health**, c2021. Disponível em:

<https://www.interiorhealth.ca/YourEnvironment/RadonGas/Pages/Access.aspx>. Acesso em: 3 fev. 2021.

IAEA. Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII): Proceedings of an International Symposium Held in Rio de Janeiro, Brazil, 18-21 October 2016. Viena: IAEA, 2018.

IEA. Monthly electricity statistics. **IEA**, 2020. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/monthly-electricity-statistics>. Acesso em: 3 jan. 2021.

INCA. O que causa o câncer?. **INCA**, 2018b. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/causas-e-prevencao/o-que-cao-cancer>. Acesso em: 8 jan. 2021.

INCA. O que é câncer?. **INCA**, 2018a. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/o-que-e-cancer>. Acesso em: 8 jan. 2021.

KRAMIDA, A.; OLSEN, K.; RALCHENKO, Y. Periodic Table: Atomic Properties of the Elements. 14 ed. NIST, 2019. Disponível em: <https://www.nist.gov/pml/periodic-table-version-history>. Acesso em: 19 dez. 2020.

KRAMER, R. *et al.* Fash and mash: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: ii. dosimetric calculations. **Physics in Medicine and Biology**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 163–189, 2009. DOI 10.1088/0031-9155/55/1/010.

LOPES, J. M. **DOSE EFETIVA COMPROMETIDA DEVIDA AOS RADIONUCLÍDEOS 40K, 226Ra, 228Ra E 228Th CONTIDOS NOS ALIMENTOS DA DIETA DA POPULAÇÃO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. 121 f.

MÂNICA, A. N. **Uso de areia monazítica como meio filtrante no tratamento de água de abastecimento público**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. 110 f.

MCCONN, R. J. *et al.* **Compendium of material composition data for radiation transport modeling**. Richland: Pacific Northwest National Lab (PNNL), rev. 1, 2011.

NEVES, L. P. *et al.* Computational dosimetry in a pediatric i-CAT procedure using virtual anthropomorphic phantoms. **Radiation Physics and Chemistry**, [S. l.], v. 167, 2020. DOI 10.1016/j.radphyschem.2019.03.040.

NOUAILHETAS, Y. **Radiações Ionizantes e a vida**. Rio de Janeiro: CNEN, 2005.

OGP. Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the Oil and Gas Industry. **OGP**, [s.l.], n. 412, p. 1-42, 2008. DOI 10.2118/179272-MS.

PEREIRA, M. A. *et al.* Dosimetric evaluation of individuals to 238U series, 232Th series and 40K radionuclides present in Brazilian ornamental rocks using computational simulation. **Ecotoxicology and environmental safety**, [S. l.], v. 173, p. 401–410, 2019. DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.02.038.

PROJETO analisará areias medicinais da praia da areia preta, em guarapari. **ES Brasil**, 2019. Disponível em: <https://esbrasil.com.br/projeto-areias-da-saude/>. Acesso em: 27 jan. 2021.

ROGERS, D. W. O. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics. **Physics in Medicine & Biology**, [S. l.], v. 51, n. 13, p. R287, 2006. DOI 10.1088/0031-9155/51/13/R17.

SILVA, A. L. M. A. da. *et al.* Radon in Brazilian underground mines. **Journal of Radiological Protection**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 607, 2018. DOI 10.1088/1361-6498/aaaf45.

SILVA, L. B. da. **CÁLCULO DE DOSE EFETIVA COMPROMETIDA E ESTIMATIVA DE INCIDÊNCIA DE CÂNCER DEVIDO A INGESTÃO DE K 40, Ra 226, Ra 228 E Th 228 EM GRÃOS DA DIETA DA POPULAÇÃO DO MUNICÍPIO DE POÇOS DE CALDAS (MG)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Instituto Alberto Luiz de Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020. 86 f. Disponível em: <http://www.con.ufrj.br/wp-content/uploads/2020/05/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Leandro-Barbosa.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

SOUSA FILHO, P. C. de; GALAÇO, A. R.; SERRA, O. A. **TERRAS RARAS: TABELA PERIÓDICA, DESCOBRIMENTO, EXPLORAÇÃO NO BRASIL E APLICAÇÕES**. **Química Nova**, [S. l.], v. 42, n. 10, p. 1208–1224, 2019. DOI 10.21577/0100-4042.20170438.

SOUZA, A. M.; SILVEIRA, C. S.; PEREIRA, R. M. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osami Utsumi em drenagens do Complexo Alcalino de Poços de

Caldas. **Geochimica Brasiliensis**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 63–76, 2013. DOI 10.21715/gb.v27i1.337.

SUPRAM TMAP. Licenciamento Ambiental N° 00042/1978/024/2007. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://sistemas.meioambiente.mg.gov.br/reunioes/uploads/X6ZXMd4z-fZAfNXK4pSX4ku4qWjuXxXj.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2021.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 10 ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.

VASCONCELOS, D. C. **Estudo da radioatividade natural em areias de praias do extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. 124 f.

WNA. Naturally-Occurring Radioactive Materials (NORM). WNA, 2020. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>. Acesso em: 31 dez. 2020.