

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA – IGUFU  
CAMPUS MONTE CARMELO - GEOLOGIA

PAULA CRISTINA BEZERRA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOSIMÉTRICA DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL EM MINERAÇÃO DE  
FOSFATO, UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO**

Monte Carmelo – MG

2024

PAULA CRISTINA BEZERRA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOSIMÉTRICA DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL EM MINERAÇÃO DE  
FOSFATO, UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da  
Universidade Federal de Uberlândia como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel em  
Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Felix Nannini

Coorientador: Prof. Dr. William de Souza Santos.

Monte Carmelo – MG

2024

PAULA CRISTINA BEZERRA DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOSIMÉTRICA DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL EM MINERAÇÃO DE  
FOSFATO, UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da  
Universidade Federal de Uberlândia, como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel em  
Geologia

Monte Carmelo, 21 de novembro de 2024.

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Felix Nannini (Orientador)  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thaís Güitzlaf Leme  
Universidade Federal de Uberlândia

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

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| O48<br>2024 | <p>Oliveira, Paula Cristina Bezerra de, 2000-<br/>AVALIAÇÃO DOSIMÉTRICA DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL EM MINERAÇÃO DE FOSFATO, UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO [recurso eletrônico] / Paula Cristina Bezerra de Oliveira. - 2024.</p> <p>Orientador: Felix Nannini.<br/>Coorientador: William Santos.<br/>Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Geologia.<br/>Modo de acesso: Internet.<br/>Inclui bibliografia.<br/>Inclui ilustrações.</p> <p>1. Geologia. I. Nannini, Felix, 1987-, (Orient.). II. Santos, William, 1979-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Geologia. IV. Título.</p> <p>CDU: 551</p> |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Dedico este trabalho a todos que me  
ajudaram ao longo desta caminhada.  
Obrigada!

## AGRADECIMENTOS

Estou concluindo mais uma etapa da minha vida e não poderia deixar de agradecer a todos que tornaram essa jornada possível e acolhedora. Primeiramente, aos meus pais, por tornarem esse sonho possível, especialmente à minha mãe, que esteve ao meu lado em todos os momentos. Mesmo à distância, suas palavras de conforto sempre me deram forças. Se hoje estou me formando, é graças a ela, que me incentivou e apoiou a seguir meus sonhos. Sem sua presença e carinho, nada disso seria possível.

Aos amigos que fizeram de Monte Carmelo um verdadeiro lar, meu sincero agradecimento. Vocês acompanharam minha trajetória desde o início do curso, tornando essa caminhada mais leve e divertida. Giovana Somera, Igor Koski, João Vitor, Letícia Lopes e Jaqueline Aparecida, obrigada por tudo; torço para que cada um de vocês realize seus sonhos, e saibam que estarão sempre no meu coração.

Ao meu amor, Leonardo Bordignon, que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis. Sua paciência, incentivo e carinho foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por ser meu porto seguro, por enxugar minhas lágrimas e por me lembrar constantemente da força que eu tenho. Que podemos sempre conquistar nossos sonhos lado a lado.

Um agradecimento mais que especial para a pessoa que sempre me recebe com o abraço mais acolhedor quando volto para São Paulo, Bolinha. Obrigada por todas as palavras de incentivo e por mesmo à distância, ser tão presente na minha vida.

A Jéssica Botelho e Izadora Gomes, as mulheres que me ensinaram na prática o que é geologia. Obrigada por cada ensinamento, pelo carinho e por me acolherem tão bem durante o estágio. Vocês são uma inspiração e um exemplo da geóloga que desejo me tornar.

A todo corpo docente da Universidade Federal de Uberlândia, obrigada por todo conhecimento e oportunidades proporcionadas ao longo dessa jornada. Cada experiência vivida dentro e fora da sala de aula foi essencial para o meu crescimento acadêmico e profissional.

## RESUMO

O minério de fosfato contém materiais radioativos de ocorrência natural (NORM), que são concentrados durante a lavra e o beneficiamento das rochas fosfáticas. Radionuclídeos primordiais, como urânio, tório e seus produtos de decaimento, podem estar presentes no minério. A área utilizada para a realização do estudo é a mineração de fosfato do Barreiro em Araxá, Minas Gerais, uma região com intrusões ígneas, onde as mineralizações fosfatadas apresentam teores relevantes de urânio e principalmente tório. Os efeitos do contato direto ou indireto com esses materiais na saúde estão diretamente relacionados à dose de radiação absorvida pelos tecidos e órgãos, ao tipo de partículas radioativas e à duração da exposição. O objetivo principal deste trabalho é fornecer coeficientes de dose efetiva e de dose equivalente para órgãos, específicos para radionuclídeos, resultantes de exposições ambientais a fótons e elétrons de trabalhadores numa mina de fosfato a céu aberto. Esses trabalhadores, expostos a solos contendo NORMs, foram representados por simuladores computacionais adultos, com base nas referências da ICRP (International Commission on Radiological Protection) 110. As simulações dosimétricas foram realizadas utilizando o *software* EDC\_Viewer (versão 3.6) da ICRP 144, considerando uma fonte radioativa plana com materiais radioativos naturais a uma profundidade de 0,5 g/cm<sup>2</sup>. Com essas simulações, foi possível avaliar as doses absorvidas pelos trabalhadores durante as diferentes etapas do processo de extração do minério, incluindo o rejeito magnético, a deslamagem, o rejeito de flotação e o produto final (concentrado de apatita).

**Palavras-chave:** Mineração de fosfato, NORMs, dosimetria, trabalhadores, simulação Monte Carlo

## ABSTRACT

Phosphate ore contains naturally occurring radioactive materials (NORM) that are generated during the mining and processing of phosphate rock. Primordial radionuclides, such as uranium, thorium, and their decay products, may be present in the ore. The area used for the study is the Barreiro phosphate mine in Araxá, Minas Gerais, a region with igneous intrusions, where the phosphate mineralizations present relevant contents of uranium and mainly thorium. The effects of these materials on health are directly related to the dose of radiation absorbed by tissues and organs, the type of radioactive particles, and the duration of exposure. The main objective of this essay is to provide effective dose and equivalent dose coefficients for organs, specific to radionuclides, resulting from environmental exposures to photons and electrons of workers in an open-pit phosphate mine. These workers, exposed to soils containing NORMs, were represented by adult computational simulators, based on ICRP (International Commission on Radiological Protection) 110 references. Dosimetric simulations were performed using the EDC\_Viewer *software* (3.6 version) from ICRP 144, considering a planar radioactive source with natural radioactive materials at a depth of 0.5 g/cm<sup>2</sup>. With these simulations, it was possible to assess the absorbed doses of workers during the various stages of the ore extraction process, including magnetic tailings, desliming, flotation tailings, and the final product, apatite concentrate.

**Keywords:** Phosphate mining, NORMs, dosimetry, workers, Monte Carlo simulation

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Série de decaimento radioativo do $^{238}\text{U}$ e $^{232}\text{Th}$ .....                                                                                                                                                    | 15 |
| <b>Figura 2:</b> Fluxograma típico de tratamento de minério.....                                                                                                                                                                                 | 18 |
| <b>Figura 3:</b> Representação esquemática da geometria simulando o campo ambiental devido à radiação natural do solo de uma mina de fosfato. ....                                                                                               | 21 |
| <b>Figura 4:</b> Principais janelas de entrada do software EDC_Viewer (versão 3.6). ....                                                                                                                                                         | 23 |
| <b>Figura 5:</b> Mapa com destaque para a Província Tocantins e destacado em vermelho o posicionamento da Faixa Brasília.....                                                                                                                    | 25 |
| <b>Figura 6:</b> Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Seta em vermelho indica a área de estudo. ....                                                                                                                             | 26 |
| <b>Figura 7:</b> Localização do depósito de fosfato do Complexo do Barreiro.....                                                                                                                                                                 | 28 |
| <b>Figura 8:</b> Mapa geológico do complexo alcalino-carbonatítico de Araxá. ....                                                                                                                                                                | 29 |
| <b>Figura 9:</b> Esquema de evolução de Ribeiro <i>et al.</i> (2014), adaptado para as séries magmáticas no complexo de Araxá e suas mineralizações. Verde: série bebedourítica, Vermelho: série foscorítica, Amarelo: série carbonatítica. .... | 30 |
| <b>Figura 10:</b> Taxa de dose de radiação na etapa da extração do minério para o $^{238}\text{U}$ . ....                                                                                                                                        | 32 |
| <b>Figura 11:</b> Taxa de dose de radiação na etapa de extração do minério para o $^{232}\text{Th}$ . ....                                                                                                                                       | 32 |
| <b>Figura 12:</b> Taxa de dose de radiação na etapa do rejeito magnético para o $^{238}\text{U}$ . ....                                                                                                                                          | 33 |
| <b>Figura 13:</b> Taxa de dose de radiação na etapa do rejeito magnético para o $^{232}\text{Th}$ .....                                                                                                                                          | 34 |
| <b>Figura 14:</b> Taxa de dose de radiação na etapa da deslamagem para o $^{238}\text{U}$ . ....                                                                                                                                                 | 34 |
| <b>Figura 15:</b> Taxa de dose de radiação na etapa da deslamagem para o $^{232}\text{Th}$ .....                                                                                                                                                 | 35 |
| <b>Figura 16:</b> Taxa de dose de radiação na etapa rejeito de flotação para o $^{238}\text{U}$ . ....                                                                                                                                           | 36 |
| <b>Figura 17:</b> Taxa de dose de radiação na etapa rejeito de flotação para o $^{232}\text{Th}$ .....                                                                                                                                           | 36 |
| <b>Figura 18:</b> Taxa de dose de radiação na etapa concentrado de apatita para o $^{238}\text{U}$ . ....                                                                                                                                        | 37 |
| <b>Figura 19:</b> Taxa de dose de radiação na etapa concentrado de apatita para o $^{232}\text{Th}$ .....                                                                                                                                        | 38 |
| <b>Figura 20:</b> Gráfico comparativo das taxas totais de doses absorvidas por todos os órgãos nas diferentes etapas do processo para o $^{238}\text{U}$ .....                                                                                   | 39 |
| <b>Figura 21:</b> Gráfico comparativo das taxas totais de doses absorvidas por todos os órgãos nas diferentes etapas do processo para o $^{232}\text{Th}$ . ....                                                                                 | 39 |
| <b>Figura 22:</b> Gráfico comparativo da dose total absorvida em todos os órgãos nas diferentes etapas do processo para o $^{232}\text{Th}$ e $^{238}\text{U}$ . ....                                                                            | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Dose média de radiação de fontes naturais. ....                                                                                                 | 13 |
| <b>Tabela 2:</b> Propriedades dos voxels dos simuladores antropomórficos utilizando a referência ICRP 110. ....                                                  | 19 |
| <b>Tabela 3:</b> Densidade e composição elementar do ar e solo .....                                                                                             | 21 |
| <b>Tabela 4:</b> concentração de atividade nas etapas do processo.....                                                                                           | 24 |
| <b>Tabela 5:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no minério $^{238}\text{U}$ .....                  | 48 |
| <b>Tabela 6:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito magnético $^{238}\text{U}$ . ....       | 49 |
| <b>Tabela 7:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, na deslamagem $^{238}\text{U}$ . ....              | 50 |
| <b>Tabela 8:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito de flotação $^{238}\text{U}$ . ....     | 51 |
| <b>Tabela 9:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no concentrado de apatita $^{238}\text{U}$ . ....  | 52 |
| <b>Tabela 10:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no minério $^{232}\text{Th}$ . ....               | 53 |
| <b>Tabela 11:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito magnético $^{232}\text{Th}$ .....      | 54 |
| <b>Tabela 12:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, na deslamagem $^{232}\text{Th}$ . ....            | 55 |
| <b>Tabela 13:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito de flotação $^{232}\text{Th}$ .....    | 56 |
| <b>Tabela 14:</b> Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no concentrado de apatita $^{232}\text{Th}$ ..... | 57 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                                                                      | 12 |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                                                                                       | 12 |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                                                                           | 13 |
| 3.1 Radiação natural                                                                                                      | 13 |
| 3.1.1 Urânio                                                                                                              | 14 |
| 3.1.2 Tório                                                                                                               | 15 |
| 3.2 Método Monte Carlo                                                                                                    | 15 |
| 3.3 Fosfato                                                                                                               | 16 |
| 3.4 Processos minerais                                                                                                    | 17 |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                                                             | 18 |
| 4.1 Simuladores antropomórficos computacionais adultos de referência                                                      | 18 |
| 4.2 Considerações da fonte de radiação da mina de fosfato                                                                 | 19 |
| 4.3 Cálculo da taxa de dose equivalente de fótons e elétrons nos simuladores antropomórficos usando simulação Monte Carlo | 22 |
| 4.4 Cálculo da dose efetiva                                                                                               | 24 |
| <b>5. GEOLOGIA REGIONAL</b>                                                                                               | 24 |
| 5.1 Província Ígnea do Alto Paranaíba                                                                                     | 26 |
| 5.2 Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá                                                                              | 28 |
| 5.3 Séries magmáticas no Complexo de Araxá                                                                                | 30 |
| <b>6. RESULTADOS</b>                                                                                                      | 31 |
| 6.1 Rejeito Magnético                                                                                                     | 33 |
| 6.2 Deslamagem                                                                                                            | 34 |
| 6.3 Rejeito de flotação                                                                                                   | 35 |
| 6.4 Concentrado de apatita                                                                                                | 37 |
| <b>7. DISCUSSÃO</b>                                                                                                       | 38 |
| <b>8. CONCLUSÃO</b>                                                                                                       | 41 |
| <b>9. REFERÊNCIAS</b>                                                                                                     | 42 |
| <b>10. ANEXOS</b>                                                                                                         | 48 |
| 10.1 Anexo A - Doses efetivas $^{238}\text{U}$                                                                            | 48 |
| 10.2 Anexo B - Doses efetivas $^{232}\text{Th}$                                                                           | 53 |

## 1. INTRODUÇÃO

Os complexos plutônicos da Província Ígnea do Alto Paranaíba abrigam as maiores reservas de fosfato do Brasil. Entre eles, destaca-se a mina de fosfato do Barreiro, localizada no complexo de Araxá.

A exploração de minério de fosfato é uma atividade industrial muito importante fornecendo matéria-prima essencial para a produção de fertilizantes e outros produtos químicos agrícolas. No Brasil, as principais fontes de fosfato para a indústria química de fertilizantes são as jazidas magmatogênicas, as quais apresentam significativo enriquecimento supergênico e estão associadas a complexos alcalino-carbonatíticos (GRASSO, 2015).

Os minerais e materiais radioativos de origem natural, conhecidos como NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*), são compostos por radionuclídeos de origem natural. Os fertilizantes fosfatados são principalmente obtidos da rocha fosfática, que é rica em apatita e contém uma concentração média de fosfato ( $P_2O_5$ ) variando entre 15% e 30%, além de argila, carbonatos e outras impurezas (FERNANDES *et al.*, 2004; IAEA, 2004).

A mineração e o processamento da rocha fosfática, que resultam na produção de ácido fosfórico ou fósforo elementar, geram resíduos que contêm NORM, incluindo urânio-238 ( $^{238}U$ ) e tório-232 ( $^{232}Th$ ) (IAEA, 2003). A exposição prolongada a esses radionuclídeos pode causar danos na saúde e aumentar o risco de desenvolvimento de câncer.

O conhecimento detalhado dos níveis de radiação e dos riscos associados permite o desenvolvimento de medidas de proteção mais eficazes e a implementação de práticas de trabalho seguras. A utilização da modelagem computacional possibilitou avaliar as doses absorvidas pelos trabalhadores nas etapas do processo de mineração, desde a extração do minério até a obtenção do concentrado de apatita.

## 2. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal avaliar os riscos associados à exposição a materiais radioativos ( $^{238}U$  e  $^{232}Th$ ) durante as operações de mineração de fosfato através de simulação Monte Carlo utilizando o *software* EDC\_Viewer (versão 3.6). Por meio de técnicas avançadas de modelagem computacional e de simuladores antropomórficos avançados, foi simulado o transporte

de aerossóis radioativos inalados no trato respiratório além de prever a deposição de dose radioativa em diversos órgãos e tecidos do corpo humano.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A exposição à radiação pode ter efeitos graves nas células do corpo humano. Quando as células são expostas à radiação, algumas podem morrer e outras sofrerem modificações. A maioria dos órgãos e tecidos podem suportar a perda de um número significativo de células sem apresentar problemas. No entanto, se muitas células forem perdidas, os órgãos podem ser danificados de forma perceptível, o que pode ser fatal. Além disso, a radiação pode modificar células sem matá-las (UNSCEAR, 2000).

Normalmente, o corpo consegue reparar esses danos, mas se o reparo não for perfeito, as células modificadas podem se dividir e transmitir essas alterações para novas células, o que pode levar ao desenvolvimento de câncer. Se as células afetadas forem aquelas que carregam informações genéticas, essas modificações podem ser passadas para os descendentes, resultando em distúrbios hereditários (UNSCEAR, 2000).

#### 3.1 Radiação natural

Os seres humanos estão expostos a radiações naturais que podem ter origem cósmica ou derivar de radionuclídeos presentes na crosta terrestre. Os minerais são constituídos por elementos que emitem radiação, entre eles estão o urânio (U), tório (Th), rádio (Ra), entre outros. A Tabela 1 apresenta dados sobre a dose efetiva média anual de radionuclídeos ionizantes, considerando tanto a exposição interna quanto a externa (UNSCEAR, 2000).

**Tabela 1:** Dose média de radiação de fontes naturais.

| Fonte                             | Dose efetiva média anual mundial (mSv) |
|-----------------------------------|----------------------------------------|
| Raios cósmicos                    | 0,4                                    |
| Radionuclídeos terrestres         | 0,5                                    |
| Radionuclídeos no corpo: inalação | 1,2                                    |
| <b>Total</b>                      | <b>2,1</b>                             |

Fonte: UNSCEAR (2000). Adaptado.

Os radionuclídeos naturais presentes na Terra originam-se das rochas. A mineração e o processamento de fosfato podem intensificar os radionuclídeos de urânio e tório. Quando essas rochas passam por processos físicos ou químicos para a extração de minérios, os radionuclídeos podem se concentrar nos produtos, subprodutos ou até mesmo nos rejeitos. Esses materiais enriquecidos com radionuclídeos são conhecidos como NORM (TEIXEIRA, 2017).

O urânio e tório e seus respectivos filhos são os radionuclídeos primordiais com maior importância, uma vez que, são responsáveis por 70% da dose a qual os seres humanos estão expostos (TEIXEIRA, 2017). As séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  (Figura 1) são as principais responsáveis pela desintegração radioativa natural e emitem radiação a cada etapa do decaimento (UNSCEAR, 2000; ATSDR, 1999; IAEA, 2003).

### 3.1.1 Urânio

O estudo detalhado da química do urânio começou após a descoberta de sua fissão em 1939, o que o estabeleceu como o combustível nuclear mais importante. O urânio natural possui três isótopos, com números de massa 234, 235 e 238 e pode existir em vários estados de oxidação: 2+, 3+, 4+, 5+ e 6+, com os estados 4+ e 6+ sendo os mais comuns na natureza (LEE, 1980).

Os isótopos  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  são radioativos e passam por uma série de decaimentos sucessivos, transformando-se em outros elementos radioativos até atingirem o elemento estável, chumbo. Durante esses processos de decaimento, uma variedade de radionuclídeos intermediários é formada, cada um emitindo radiação característica. Esse comportamento de decaimento é fundamental para diversas aplicações, incluindo a geração de energia nuclear e a datação geológica (TEIXEIRA, 2017).

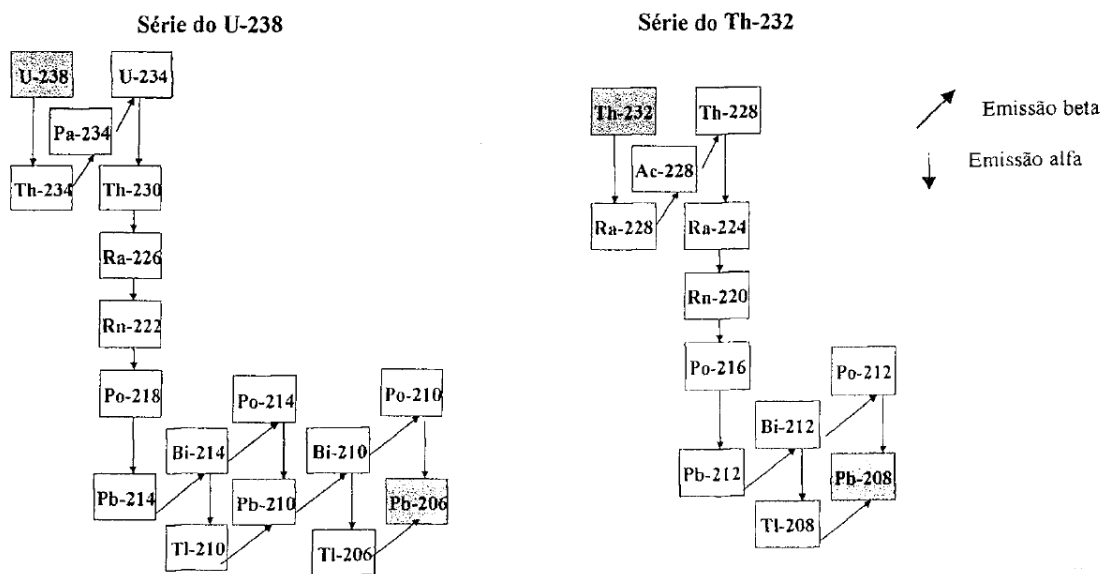
O urânio está presente no solo e na maioria das rochas, com concentrações que podem atingir até 120 ppm em rochas fosfáticas (TEIXEIRA, 2017). Essa alta concentração se reflete nos fertilizantes fosfatados comerciais, que também apresentam níveis elevados de urânio (EISENBUD, 1987). De acordo com estudos realizados por Rivas (2005), a quantidade de urânio no ambiente aumentou significativamente nos últimos 50 anos devido a atividades humanas, como a extração de urânio em minas, a indústria nuclear e o uso de fertilizantes na agricultura.

### 3.1.2 Tório

O tório (Th) é um elemento naturalmente encontrado em diversas rochas e solos, com concentrações que variam de 8,1 a 33 ppm em rochas ígneas (TEIXEIRA, 2017). O isótopo  $^{232}\text{Th}$  passa por uma série de decaimentos radioativos, começando com a emissão de uma partícula alfa e radiação gama, resultando na formação do  $^{228}\text{Ra}$ . Esse processo continua com a emissão de radiação e a formação de novos radionuclídeos, até que se atinge o  $^{208}\text{Pb}$ , um elemento estável (UMISED, 2007).

O tório possui comportamento geoquímico similar ao do urânio, podendo substituir elementos terras-raras em alguns minerais, também podendo se associar à apatita e ao esfeno (KABATA-PENDIAS, 2000).

Figura 1: Série de decaimento radioativo do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ .



Fonte: IAEA (2005).

### 3.2 Método Monte Carlo

O código de transporte de radiação Monte Carlo N-Particle (MCNPX) é um método matemático utilizado para resolver problemas físicos e matemáticos através de estatística e simulação de variáveis aleatórias (PELOWITZ, 2008).

Muito utilizado para cenários de transporte de radiação, onde o processo estocástico pode ser visto como um conjunto de partículas com coordenadas individuais que se deslocam

aleatoriamente colidindo entre si. A simulação é muito útil em problemas complexos que não podem ser simulados por métodos determinísticos (BELCHIOR, 2007). Esse método tem sido muito utilizado para as áreas de ciências sociais, química quântica, ciências da radiação, radioterapia e dosimetria (BIELAJEW, 1998).

### 3.3 Fosfato

O fósforo (P) é um elemento químico do grupo dos metalóides, está presente nas estruturas de minerais formando radicais aniônicos com o oxigênio ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) e faz parte de uma classe denominada de fosfatos (DANA, 1981). É o décimo elemento mais comum na natureza e está presente na crosta terrestre com uma concentração de 1.050 ppm, e em carbonatitos, granitos e diabásios com teores médios de 8.690 ppm, 650 ppm e 390 ppm, respectivamente (HEINRICH, 1966; MASON, 1971).

O P está presente em diversos minerais, porém, apenas na série da apatita constitui minerais de minério. Em rochas ígneas, podem ser encontrados minerais variados, como: fluorapatita, hidroxiapatita e cloroapatita. Nas rochas sedimentares, pode ocorrer carbonatoapatita e carbonato-fluorapatita (LOUREIRO *et al.*, 2008).

A apatita apresenta fórmula química  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ . No entanto, o íon  $\text{Ca}^{2+}$  pode ser substituído por outros cátions, como elementos terras raras (ETR), U e Pb (LOUREIRO *et al.*, 2005). Quando são encontrados em quantidades e concentrações adequadas, podem formar depósitos de valor econômico. Esses minérios podem ser utilizados diretamente ou após beneficiamento na fabricação de produtos comerciais, sendo a principal aplicação na agricultura como fertilizante (LOUREIRO *et al.*, 2005).

O fosfato, apesar do seu interesse econômico, apresenta materiais radioativos de origem natural (NORM) que são concentrados pela lavra e beneficiamento de rocha fosfática. Nos minérios fosforíticos sedimentares pode haver incorporação de urânio através da substituição iônica nos cristais de carbonato-fluoroapatita ou por absorção. Porém, como no caso da área de estudo, as mineralizações fosfatadas ígneas apresentam menor teor de urânio e são mais enriquecidas em tório (FERNANDES *et al.*, 2004)

### 3.4 Processos minerais

O processo de beneficiamento mineral de apatita tem como finalidade a produção do concentrado apatítico. Para ser utilizado como matéria prima na fabricação de fertilizantes deve apresentar qualidade adequada, com um teor médio de  $P_2O_5$  entre 32% e 36%, razão  $CaO/P_2O_5$  menor que 1,6, taxa de  $MgO$  menor que 1%,  $Fe_2O_3$  menor ou igual a 1,6 e  $Al_2O_3$  menor ou igual a 0,4 (TESTE, 2008; HARBEN, 2002).

Após a extração do minério de fosfato em minas a céu aberto, o material é enviado às usinas de beneficiamentos para sua concentração. A primeira etapa é a britagem, onde é responsável pela fragmentação dos blocos de minérios até a granulometria desejada (CETEM, 2010). Posteriormente passa pela estocagem e homogeneização do material. A moagem consiste no último processo de fragmentação, o minério é diminuído até um tamanho adequado pela combinação de compressão, abrasão, impacto e atrito em moinhos de barras e bolas (CETEM, 2010).

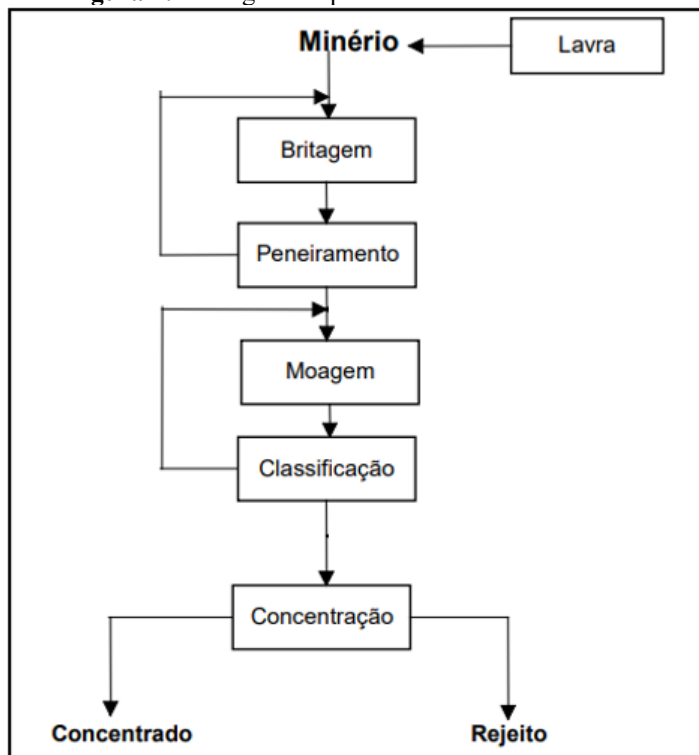
A etapa de separação magnética é utilizada para concentração ou purificação de minerais. Os minerais são atraídos ou repelidos pelo campo magnético, os não magnéticos e radioativos, com isso, elementos de urânio e tório acabam se concentrando nos rejeitos magnéticos (CETEM, 2010). A etapa de deslamagem remove partículas finas que podem comprometer a eficiência da flotação. Ao remover as partículas finas, o processo garante que a flotação possa ocorrer com mais eficiência, permitindo uma melhor recuperação do minério e onde pode ocorrer concentração adicional de radionuclídeos (CETEM, 2010; NASCIMENTO, 2014)

Na flotação, a apatita é separada dos outros minerais presentes na rocha fosfática. Para isso, uma mistura de minério e água, chamada polpa é adicionada à suspensão com bolhas de ar. As partículas hidrofóbicas aderem às bolhas e são levadas à superfície, onde são separadas na espuma, formando o produto flotado, enquanto os minerais hidrofílicos permanecem na fase aquosa, formando o produto afundado (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; MASSI *et al.*, 2008; OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

A Figura 2 apresenta um fluxograma típico do processo de tratamento de minério. O processo de cominuição ocorre nas etapas de britagem e moagem, seguido por um peneiramento ou classificação para evitar cominuição excessiva. Após a redução do tamanho do minério, são

realizadas as etapas de concentração magnética e flotação, resultando em um concentrado e um rejeito.

**Figura 2:** Fluxograma típico de tratamento de minério.



Fonte: CETEM (2010). Adaptado.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Simuladores antropomórficos computacionais adultos de referência**

Os simuladores computacionais têm sido amplamente utilizados para modelar o corpo humano em conjunto com códigos de transporte de radiação, a fim de avaliar os coeficientes de taxa de dose equivalente em órgãos, com foco na proteção radiológica.

Nos últimos vinte anos surgiram os simuladores em voxel, que são construídos a partir de dados de imagens médicas de pessoas reais, ao contrário dos modelos de corpo computacional mais estilizados e antigos. Um modelo em voxel é uma representação tridimensional do corpo humano composto por uma matriz de números de identificação dispostos em seções, linhas e colunas. Cada entrada nessa matriz representa um voxel de tecido. Os órgãos são representados por conjuntos de

voxels que compartilham o mesmo número de identificação e são organizados espacialmente para representar adequadamente o volume de cada órgão.

Esses simuladores foram criados a partir de imagens de tomografia computadorizada (CT) de indivíduos reais (FISCHER, 1994). Os modelos masculino e feminino de referência da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) são amplamente utilizados para o cálculo de doses de radiação ionizante (ICRP, 2009). Cada voxel é atribuído a um tipo de tecido ou órgão com base em sua composição e localização, com ajustes para corresponder aos dados da ICRP 89 (ICRP, 2009). As principais características desses dois simuladores antropomórficos adultos são estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Propriedades dos voxels dos simuladores antropomórficos utilizando a referência ICRP 110.

| Propriedade                         | Masculino | Feminino   |
|-------------------------------------|-----------|------------|
| Altura (m)                          | 1,76      | 1,63       |
| Massa (kg)                          | 73        | 60         |
| Dimensão de voxel em Z (mm)         | 8         | 4,84       |
| Dimensão do voxel em X e Y (mm)     | 2,137     | 1,775      |
| Volume do voxel (mm <sup>3</sup> )  | 36,54     | 15,25      |
| Número de voxels ao longo do eixo X | 254       | 299        |
| Número de voxels ao longo do eixo Y | 127       | 137        |
| Número de voxels ao longo do eixo Z | 222       | 348        |
| Número de voxels de tecido          | 1.950.255 | 3.887.730  |
| Número de voxels vazios             | 5.211.021 | 10.367.394 |
| Número total de voxels              | 7.161.276 | 14.255.124 |

Fonte: ICRP 110 (2009).

#### 4.2 Considerações da fonte de radiação da mina de fosfato

Neste estudo, utilizou-se modelagem e simulação para analisar o comportamento de radionuclídeos depositados no solo da mina e seus efeitos na exposição à radiação, aplicando técnicas de simulação Monte Carlo por meio do *software* EDC\_Viewer (versão 3.6), conforme a Publicação 144 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2020).

Para simular a exposição à radiação natural foi abordado um caso típico de fonte ambiental, o solo de uma mina com material radioativo de ocorrência natural (NORM). A fonte foi considerada com geometria plana semi-infinita e em diferentes profundidades no solo.

Inicialmente os radionuclídeos ao serem depositados no solo são considerados como uma camada plana na superfície. Com o tempo, eles migram e se infiltram, criando perfis de

concentrações variáveis. Para simular a radiação proveniente desses radionuclídeos, a distribuição em profundidade é aproximada por várias fontes planas distribuídas no solo, cada uma representando diferentes profundidades (MATSUDA *et al.*, 2015). Esse método permite simplificar a modelagem da exposição em solos contaminados.

A simulação utiliza uma geometria simplificada para representar o ar sobre o solo, assumindo o terreno como uma superfície plana e infinita. Embora essa abordagem seja uma idealização, ela é considerada conservadora e prática para cálculos de dose em várias situações reais. Esse modelo simplificado permite estimar a exposição à radiação de forma precisa, sem a necessidade de simulações mais complexas e demoradas (MALINS *et al.*, 2015).

Para muitas situações simular até 4 mfp (mfp – caminho médio livre) é suficiente, mas variações no perfil de profundidade, como a aração do solo, podem justificar a simulação de uma faixa maior de profundidades. Assim, são calculados dose equivalente para uma gama de mfp, permitindo uma integração mais precisa ao modelar fontes contínuas de radiação no solo. A interface ar-solo é idealizada como uma superfície plana, sem coberturas, embora fatores reais, como vegetação e irregularidades no solo, influenciem a proteção contra fontes superficiais.

A geometria da simulação é representada por um cilindro de ar com altura de 3 mfp, que se estende até o solo, com profundidades variando de acordo com a energia dos fótons. A profundidade mínima da fonte no solo é de 2 mfp para as fontes na superfície (0,0 mfp) e de 5 mfp para fontes mais profundas (4,0 mfp). A geometria circular do cilindro, com raio equivalente a cinco vezes o mfp dos fótons no ar, simula uma fonte plana infinita.

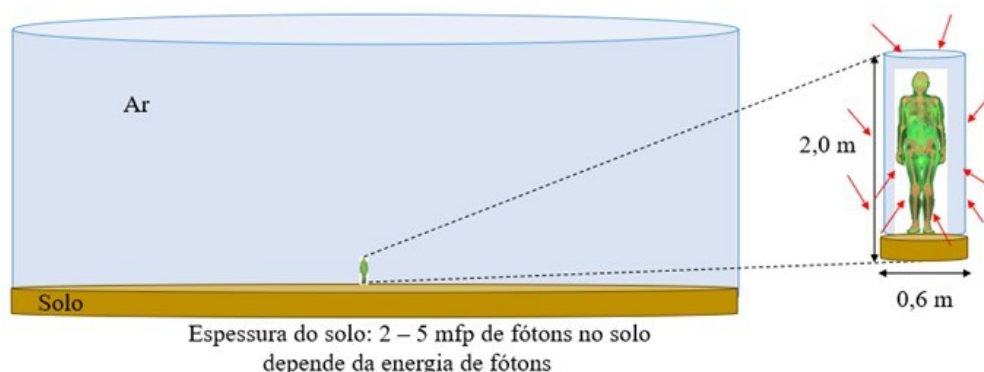
A composição e densidade do solo e do ar são definidas com base em dados da ICRP (1994) e do NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Neste estudo, as doses equivalentes de um conjunto de órgãos e tecidos dos simuladores antropomórficos computacionais foram calculadas considerando uma densidade de solo de  $1,0 \text{ g/cm}^3$  e a do ar  $1,2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ .

A simulação envolve 25 energias iniciais de fótons, variando de 0,01 a 8 MeV, cobrindo o espectro energético de radionuclídeos naturais. O solo é tratado como uma interface plana, e tanto a absorção quanto o espalhamento dos campos de radiação são considerados nos cálculos. O transporte de partículas no ambiente é registrado na superfície de um cilindro que possui 0,6 m de diâmetro e 2 m de altura.

A Figura 3 (à esquerda) ilustra a geometria de simulação, que consiste em um cilindro circular composto por uma camada de ar com 3 mfp de altura e uma camada de solo cuja

profundidade depende da energia dos fótons. Uma espessura adicional de pelo menos 1 mfp foi incluída abaixo da fonte para contabilizar eventos de retroespalhamento nas camadas mais profundas. O raio do cilindro é aproximadamente cinco vezes o mfp dos fótons no ar, o que aproxima a geometria infinita de uma fonte plana. Estudos anteriores (SATOHI *et al.*, 2014) demonstraram que esse tamanho de geometria é adequado para simular o transporte de fótons em ambientes contaminados.

**Figura 3:** Representação esquemática da geometria simulando o campo ambiental devido à radiação natural do solo de uma mina de fosfato.



Fonte: autoria própria.

A Tabela 3 lista a densidade e a composição elementar do ar e do solo usadas nos cálculos. Os valores para o solo foram retirados da ICRP (1994) e os dados para ar seco foram obtidos do NIST. As densidades consideradas foram  $1,0 \text{ g/cm}^3$  para o solo e  $1,2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$  para o ar. Embora, em situações reais, as densidades do solo sejam geralmente maiores que  $1,0 \text{ g/cm}^3$  e possam variar conforme a localização e a profundidade, essa variação não altera a relação entre a intensidade da fonte e o campo de radiação no ar, desde que a profundidade da fonte seja expressa em  $\text{g/cm}^2$ . Além disso, foi demonstrado que mudanças na composição do solo não afetam significativamente os campos de fótons transportados na superfície de acoplamento de um Fantom (SAITO E JACOB, 1995).

**Tabela 3:** Densidade e composição elementar do ar e solo

| Material | Densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) | Composição elementar (%) |                   |      |      |     |      |      |     |
|----------|-------------------------------|--------------------------|-------------------|------|------|-----|------|------|-----|
|          |                               | H                        | C                 | N    | O    | Al  | Si   | Ar   | Fe  |
| Ar       | $1,2 \times 10^{-3}$          | -                        | $1,0 \times 10^2$ | 75,5 | 23,2 | -   | -    | 1,28 | -   |
| Solo     | 1,0                           | 2,2                      | -                 | -    | 57,5 | 8,5 | 26,2 | -    | 5,6 |

Fonte: BERGER *et al.*, (2005); ICRP (1994).

Os simuladores antropomórficos foram empregados para representar os trabalhadores de uma mina de fosfato situada no estado de Minas Gerais, Brasil. Essa abordagem visa avaliar as doses equivalentes nos órgãos e tecidos desses trabalhadores, considerando a exposição a radionuclídeos presentes nos materiais de resíduos naturais (NORMS) do solo da mina.

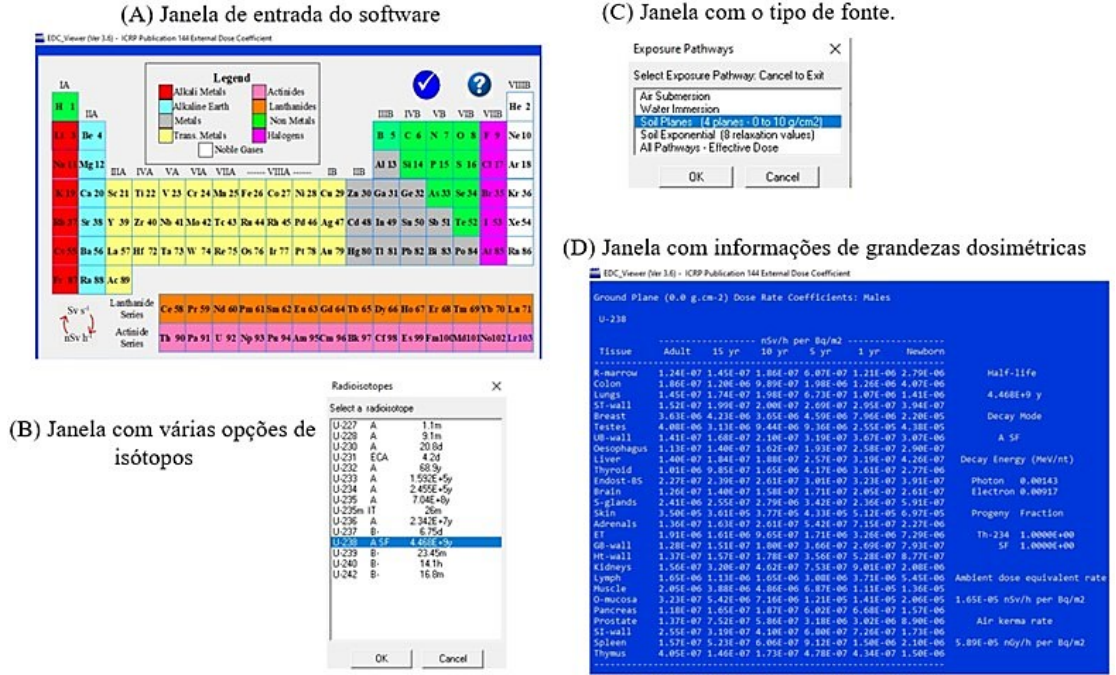
Os radionuclídeos de interesse incluem o  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , que podem impactar a saúde dos trabalhadores devido à sua presença no ambiente de trabalho. A utilização dos simuladores permitirá uma análise detalhada das doses recebidas, contribuindo para a implementação de medidas de proteção radiológica adequadas e para a segurança dos profissionais da mina de fosfato.

#### **4.3 Cálculo da taxa de dose equivalente de fótons e elétrons nos simuladores antropomórficos usando simulação Monte Carlo**

Neste estudo foi realizada a simulação do transporte de fótons e elétrons em simuladores antropomórficos, abordando exposições a campos de radiação gerados pela presença de NORMs no solo de uma mina de fosfato. Os resultados fornecidos pelo *software* EDC\_Viewer (versão 3.6) retorna com dados de um conjunto de coeficiente de conversão para dose equivalente, taxa equivalente de dose ambiente e taxa de kerma no ar, todas normalizadas pela concentração de atividade por área.

A Figura 4 mostra a tela de entrada do *software*, permitindo o usuário escolher dezenas de radionuclídeos (A). No exemplo, o usuário escolheu o radionuclídeo  $^{92}\text{U}$  e o *software* abriu uma janela com várias opções de radioisótopos (B). O usuário pode escolher vários modelos de fontes (C). Após essa etapa, o *software* fornece as principais informações dosimétricas e algumas características do radionuclídeo escolhido na simulação (D).

**Figura 4:** Principais janelas de entrada do *software* EDC\_Viewer (versão 3.6).



Fonte: autoria própria.

Os coeficientes de taxa de dose equivalente, devido a presença de NORMs no solo, foram calculados para fontes monoenergéticas de fótons e elétrons no solo, com energias variando de 0,01 a 8 MeV ao longo de 25 pontos de energia. Os resultados são apresentados em nSv/h/Bq/m<sup>2</sup> que, posteriormente foram convertidos para taxa de dose equivalente em nSv/h usando a Equação 1. As taxas de doses efetivas foram avaliadas a partir dos dados de taxas de dose equivalente dos órgãos calculadas usando os simuladores antropomórficos computacionais de referência ICRP para adultos.

$$\dot{H} \left( \frac{nSv}{h} \right) = CC_H \times A \times h \quad (1)$$

Onde  $\dot{H} \left( \frac{nSv}{h} \right)$  é a taxa de dose equivalente,  $CC_H \left( \frac{nSv \times m^2}{h \times Bq} \right)$  é o coeficiente de conversão obtido por meio do *software* EDC\_Viewer (versão 3.6),  $A \left( \frac{Bq}{Kg} \right)$  é a atividade específica da amostra de solo e  $h \left( \frac{Kg}{m^2} \right)$  é a profundidade da fonte de radiação no solo da mina.

As atividades específicas usadas para os cálculos das taxas de doses equivalentes, em função de cada etapa do processo (Tabela 4), foram obtidas da publicação do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral): Impactos radiológicos da indústria de fosfato (FERNANDES *et al.*, 2004).

**Tabela 4:** concentração de atividade nas etapas do processo.

| Etapa do processo       | Concentração de atividade (Bq/kg) |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                         | <sup>238</sup> U                  | <sup>226</sup> Ra | <sup>210</sup> Pb | <sup>232</sup> Th | <sup>228</sup> Ra |
| Minério                 | 114 ± 8                           | 330 ± 41          | 800 ± 172         | 204 ± 21          | 350 ± 123         |
| Rejeito Magnético       | 129 ± 9                           | 150 ± 19          | 620 ± 152         | 54 ± 6            | 490 ± 138         |
| Deslamagem              | 237 ± 16                          | 282 ± 35          | 2169 ± 256        | 256 ± 26          | 621 ± 152         |
| Rejeito de flotação     | 174 ± 12                          | 199 ± 25          | 620 ± 152         | 204 ± 21          | 796 ± 171         |
| Concentração de apatita | 169 ± 11                          | 300 ± 38          | 980 ± 191         | 91 ± 9            | 1170 ± 213        |

Fonte: PIRES DO RIO *et al.*, (2002); FERNANDES *et al.*, 2004.

#### 4.4 Cálculo da dose efetiva

A dose efetiva (E) para a população pode ser calculada utilizando o coeficiente de conversão de dose absorvida apresentada na seção anterior. Neste estudo, as doses efetivas anuais para ambientes externos decorrente das exposições dos trabalhadores da mina foi calculada por meio da equação 2:

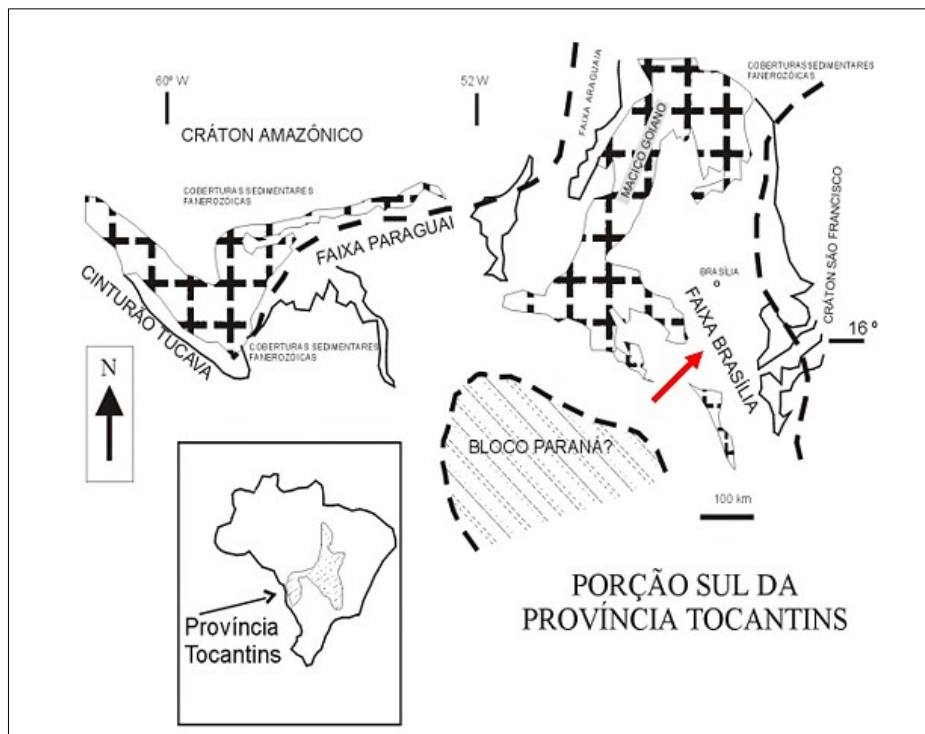
$$E \left( \frac{nSv}{ano} \right) = CC_E \times A \times h \times t \quad (2)$$

Onde  $E \left( \frac{nSv}{ano} \right)$  é a dose efetiva anual,  $CC_E \left( \frac{nSv \times m^2}{h \times Bq} \right)$  é o coeficiente de conversão para dose efetiva obtido por meio do *software* EDC\_Viewer (versão 3.6),  $h$  (g/cm<sup>2</sup>) é a profundidade do material radioativo no solo e  $t \left( \frac{h}{ano} \right)$  é a carga horária de trabalho anual do trabalhador. Neste estudo, a estimativa da carga horária do trabalhador foi feita considerando que o tempo médio anual de exposição à radiação é de 1920 horas.

### 5. GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está localizada na região de Araxá, inserida na parte oriental da Província Tocantins e no setor meridional da Faixa Brasília. Esta província é um orógeno Neoproterozoico de grande extensão situado no Brasil Central. A Província Tocantins é delimitada pelo Cráton Amazônico a oeste, pelo Cráton São Francisco a leste e pelas bacias do Parnaíba ao norte e Paraná ao sul (ALMEIDA *et al.*, 1986; DARDENNE, 2000). A Faixa Brasília está posicionada entre o Cráton São Francisco e o Bloco Paranapanema (Figura 5).

**Figura 5:** Mapa com destaque para a Província Tocantins e destacado em vermelho o posicionamento da Faixa Brasília.



Fonte: FUCK (1994); NETO (2003). Adaptado.

Ao longo da margem ocidental do Cráton São Francisco, desenvolveu-se a principal unidade dessa província, a Faixa Brasília. Esta unidade compreende um cinturão de dobramentos de idade Neoproterozoica, com orientação norte-sul, abrangendo partes dos estados de Minas Gerais, Goiás e Tocantins (UHLEIN *et al.*, 2012). Nesta faixa, ocorre atividade magmática, caracterizada por vulcanismo andesítico ao norte e pela intrusão de plútons graníticos ao sul. Entre os recursos minerais presentes, destacam-se rochas carbonáticas, fosforitos sedimentar, chumbo e zinco (ALMEIDA *et al.*, 1986).

De acordo com estudos realizados por Fuck (1994), a Faixa Brasília é subdividida em três unidades estruturais distintas: cratônica, externa e interna.

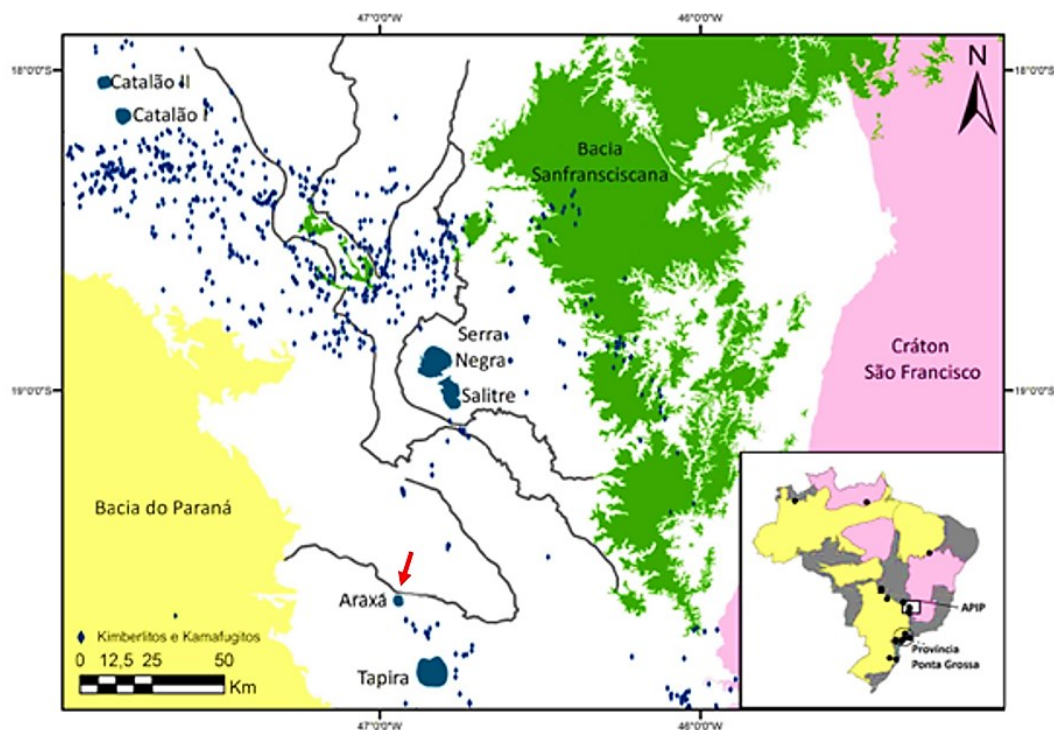
A primeira unidade expõe o embasamento e extensas coberturas fanerozóicas, representada pelos grupos Bambuí e Vazante. A delimitação dessa unidade com a Faixa Brasília é marcada por falhas de empurrão de baixo a médio ângulo, expondo os grupos Paranoá e Canastra (UHLEIN *et al.*, 2012). A região externa é composta por grupos metassedimentares: Vazante, Ibiá, Canastra, Natividade, Araí, pertencentes ao Mesoproterozóico (SANTOS, 2019), além disso, há porções do

embasamento Arqueano-Paleoproterozóico evidenciando a presença de rejuvenescimento ocasionado pela tectônica brasileira (UHLEIN *et al.*, 2012). A unidade interna é representada pelo grupo Araxá e sequências metassedimentares neoproterozóicas (FUCK, 1994).

### 5.1 Província Ígnea do Alto Paranaíba

No Cretáceo Superior (85 Ma atrás), os estados de Minas Gerais, Goiás e São Paulo passaram pelo soerguimento do Alto Paranaíba, acompanhado por intensas atividades magmáticas potássicas e máfico-ultramáficas. Esses eventos resultaram na formação da Província Ígnea do Alto Paranaíba, uma das maiores províncias ultrapotássicas do mundo, caracterizada pela presença de abundantes rochas alcalinas ultramáficas (BOLOGNA, 2002) (Figura 6).

**Figura 6:** Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Seta em vermelho indica a área de estudo.



Fonte: Modificado a partir de OLIVEIRA *et al.*, (2004)

De acordo com o estudo de Frolov (1971), observa-se que, nos complexos alcalinos carbonatíticos, há um aumento significativo de rochas ultrabásicas e rochas alteradas à medida que os maciços são erodidos, resultando em uma diminuição na quantidade de carbonatitos. A formação

de rochas alcalinas-ultrabásicas e carbonatitos pode ocorrer a partir de magma proveniente de grandes profundidades, que se desloca através das rochas supracrustais até alcançar a superfície.

No contexto evolutivo, ocorre a injeção de material alcalino que substitui os ultrabásitos iniciais e atinge os níveis mais elevados do maciço. Por fim, esse processo resulta na formação de zonas bem definidas, contribuindo para a construção de plútons ou vulcões e acarretando o desenvolvimento de camadas verticais com diferenciação de mineralização. Os maciços ultrabásicos são compostos por minerais ricos em titânio e fósforo e os maciços carbonatíticos possuem nióbio, tântalo, urânio e fósforo (FROLOV, 1971).

Nos complexos carbonatíticos são identificados três tipos principais de magmas: silicático, carbonático e fosfático. Esses magmas não necessariamente ocorrem juntos e podem gerar diferentes produtos ao longo de sua evolução, resultando em séries petrogenéticas distintas. A relação entre esses magmas é complexa e depende de diversos processos, como cristalização fracionada, imiscibilidade de líquidos, desgaseificação e metassomatismo. (GRASSO, 2015). A mina de fosfato do Barreiro, Araxá é constituída pela série bebedourítica, foscorítica e carbonatítica.

A série bebedourítica é composta por rochas que se formam através da cristalização fracionada de um magma silicático ultrapotássico (BARBOSA *et al.*, 2012). Segundo a definição de Troger (1928), a série é caracterizada como um clinopiroxenito rico em perovskita, com mineralogia de 54% diopsídio, 21% flogopita, 14% perovskita, 10% minerais opacos e quantidades acessórias de apatita, feldspato potássico e olivina. No entanto, essa série apresenta uma composição modal bastante variável, como observado nos casos dos complexos máfico ultramáficos alcalinos de Araxá, Tapira e Salitre, onde a apatita é frequentemente um componente essencial, e não acessório.

A série foscorítica é formada por rochas oriundas de magmas fosfáticos e é encontrada em todos os complexos do Alto Paranaíba, em Araxá e Catalão onde encontram-se importantes depósitos de nióbio e fosfato (BROD, 1999). Conforme Yegorov (1993), a série apresenta composição modal constituída por apatita, magnetita e olivina.

A classificação da série carbonatítica baseia-se no tipo de carbonato predominante na rocha. Se a rocha contém mais de 50% de calcita, é classificada como calcita carbonatito, se for

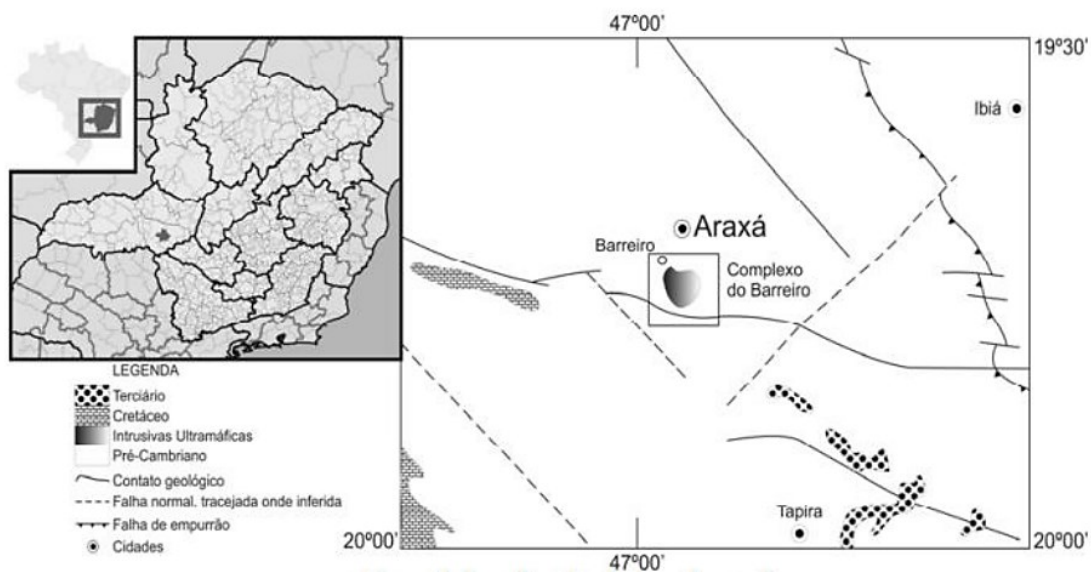
predominante dolomita, é denominada dolomita carbonatito. Carbonatos alcalinos são chamados de natrocarbonatitos, enquanto carbonatitos predominantemente formados por ankerita e/ou siderita são conhecidos como ferrocarbonatitos (LE MAITRE, 2002).

A intrusão dos magmas carbonatíticos foi frequentemente seguida por desgaseificação, resultando em intensa alteração metassomática nas rochas alcalinas pré-existentes, especialmente os bebedouritos, alterando-as para flogopititos (RIBEIRO *et al.*, 2014; CORDEIRO *et al.*, 2011; BROD, 1999)

## 5.2 Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá

Os depósitos de fosfato do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro estão situados a 6 km da cidade de Araxá, em Minas Gerais (Figura 7). Esses depósitos são de origem ígnea, resultantes de movimentações intensas de magmatismo carbonatítico, responsáveis pelas intrusões ultrabásicas alcalinas (PIRES RIO, 1999). A intrusão nas rochas metassedimentares encaixantes do Grupo Ibiá causou arqueamento, levando ao desenvolvimento de fraturas radiais e deformando-as em uma estrutura dômica (Figura 8) (SEER & DARDENNE, 2000; TRAVERSA *et al.*, 2001).

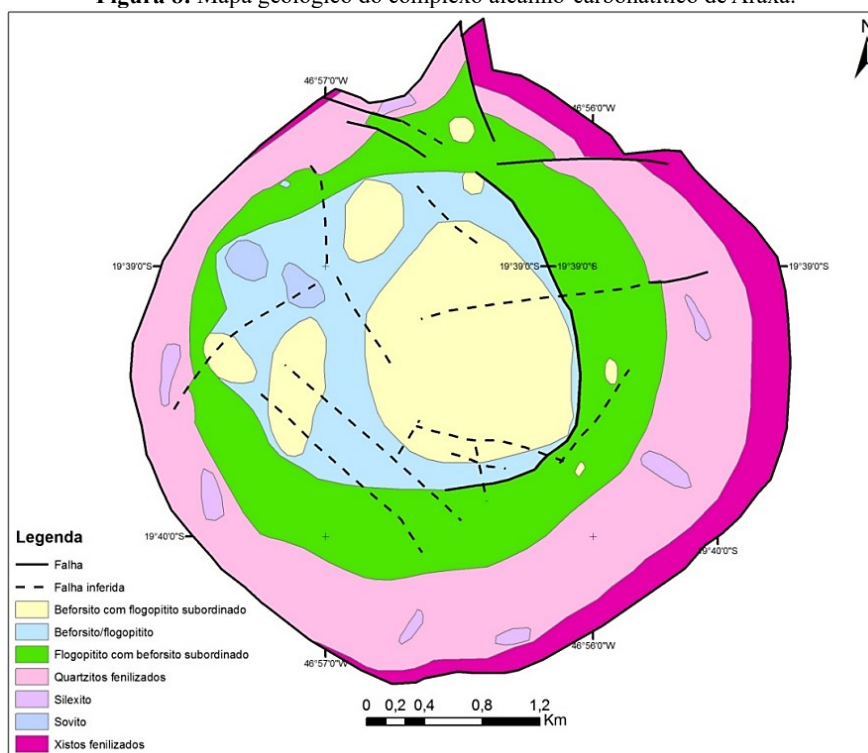
**Figura 7:** Localização do depósito de fosfato do Complexo do Barreiro.



Fonte: CRUZ *et al.*, (2011).

A rocha predominante do complexo é o flogopitito e constitui a encaixante dos eventos metassomáticos, cortada por *necks*, *plugs* e veios carbonatíticos, além de veios e diques apatítico, nelsonito, magnetita e barita (TORRES, 1996). De acordo com estudos de Traversa *et al.* (2001), o complexo é composto por um núcleo carbonatítico e uma complexa rede de diques radiais e concêntricos, além de veios menores. Recobrimdo-o, ocorre um espesso manto de intemperismo com espessura de até 230 m (RODRIGUES *et al.*, 1984).

**Figura 8:** Mapa geológico do complexo alcalino-carbonatítico de Araxá.



Fonte: SILVA *et al.*, (1979). Adaptado.

Os carbonatitos ocorrem predominantemente como diques e veios, cortando flogopititos metassomáticos (SILVA *et al.*, 1979). Existem várias fases de injeção de líquido carbonatítico, que são responsáveis pela brechação das rochas alcalinas encaixantes. O primeiro carbonatito é dolomítico, com granulação variando de média a grossa, podendo conter quantidades menores de calcita, ankerita, apatita, flogopita, entre outros minerais.

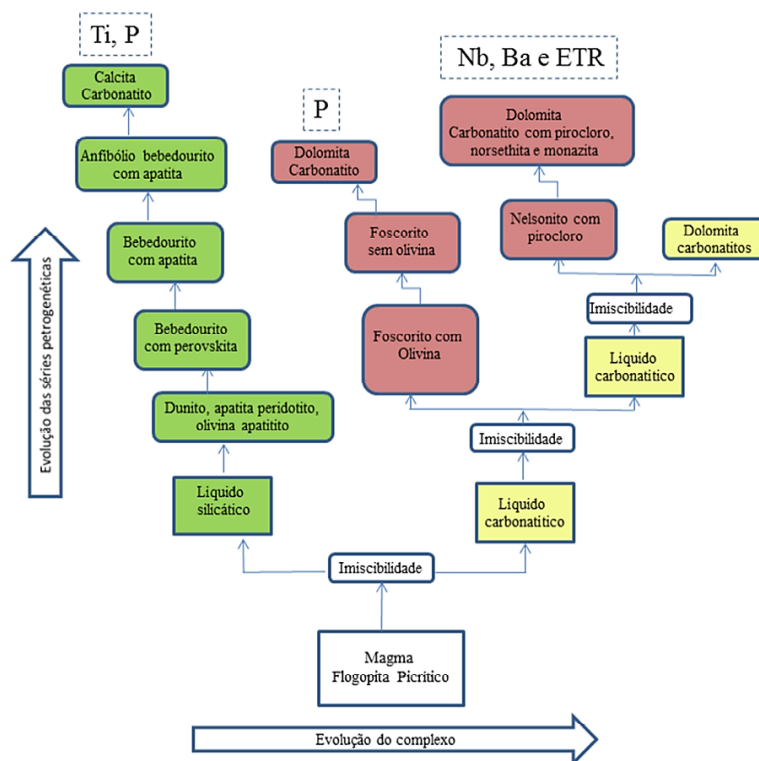
Além disso, diques de carbonatitos calcíticos ocorrem de forma subordinada na porção NW do complexo (SILVA *et al.*, 1979). Veios de apatita e magnetita encontram-se intrudindo os flogopititos e carbonatitos, há também veios de barita e silexito (TORRES e GASPAR, 1995a). As

rochas carbonatíticas apresentam em sua composição apatitas com um teor de  $P_2O_5$  entre 5 e 15%. O principal grupo de apatitas presente nesse tipo de rocha é a fluorapatita, sendo um mineral de cálcio com flúor (SOUZA e FONSECA, 2009).

### 5.3 Séries magmáticas no Complexo de Araxá

As mineralizações de fosfato em complexos carbonatíticos podem estar associados a concentração de rochas bebedouríticas ricas em apatitas (Figura 9). Essas rochas derivaram da evolução de um magma flogopita picrito, que, após a fase inicial da cristalização fracionada, atingiu a saturação em  $CO_2$  formando dois líquidos imiscíveis: silicático e carbonatítico (GRASSO, 2015).

**Figura 9:** Esquema de evolução de Ribeiro *et al.* (2014), adaptado para as séries magmáticas do complexo de Araxá e suas mineralizações. Verde: série bebedourítica, Vermelho: série foscorítica, Amarelo: série carbonatítica.



Fonte: GRASSO (2015).

A partir da cristalização fracionada do líquido silicático originou cumulos duniticos e bebedouríticos que inicialmente eram ricos em perovskita e, posteriormente em apatita. Os membros mais primitivos da série bebedourítica de Araxá são os dunitos, peridotitos apatíticos e

olivinas apatíticos, os quais são formados por acumulação de olivina, apatita e as vezes perovskita. Após a extração desses minerais, por meio da cristalização fracionada, a evolução do líquido silicático continuou formando perovskita clinopiroxenitos e perovskita-bebedouritos, que constituem protominérios de titânio (RIBEIRO *et al.*, 2014; BROD *et al.*, 2000).

Durante a cristalização, a olivina consome MgO e a perovskita  $\text{TiO}_2$  resultando assim um líquido residual mais evoluído, do qual se formam os bebedouritos ricos em apatita. Após a extração dos bebedouritos ricos em apatita, a evolução do magma continuou ocorrendo, gerando anfibólio bebedouritos. Por fim, os calcita carbonatitos são interpretados como resíduos da cristalização fracionada da série bebedourítica (GRASSO, 2015).

Após a formação do líquido carbonatítico ocorre um segundo evento de imiscibilidade, formando um líquido foscorítico e outro carbonatítico. No líquido foscorítico ocorre extração de olivina, apatita e magnetita formando foscoritos ricos em olivina, sendo o principal responsável pela mineralização primária de fosfato em Catalão I e em Araxá (GRASSO *et al.*, 2006, PALMIERI *et al.*, 2006, RIBEIRO, 2008). A evolução do líquido continua gerando um foscoritos pobres em olivina e os dolomita carbonatitos são os protominérios de fosfato em Araxá.

O líquido residual resultante da cristalização do nelsonito com pirocloro é um carbonatito enriquecido em Nb, Ba e ETR. Esse líquido deu origem aos dolomita carbonatitos contendo pirocloro, nosethita e monazita, que formam os protominérios de nióbio, barita e terras raras (GRASSO, 2015).

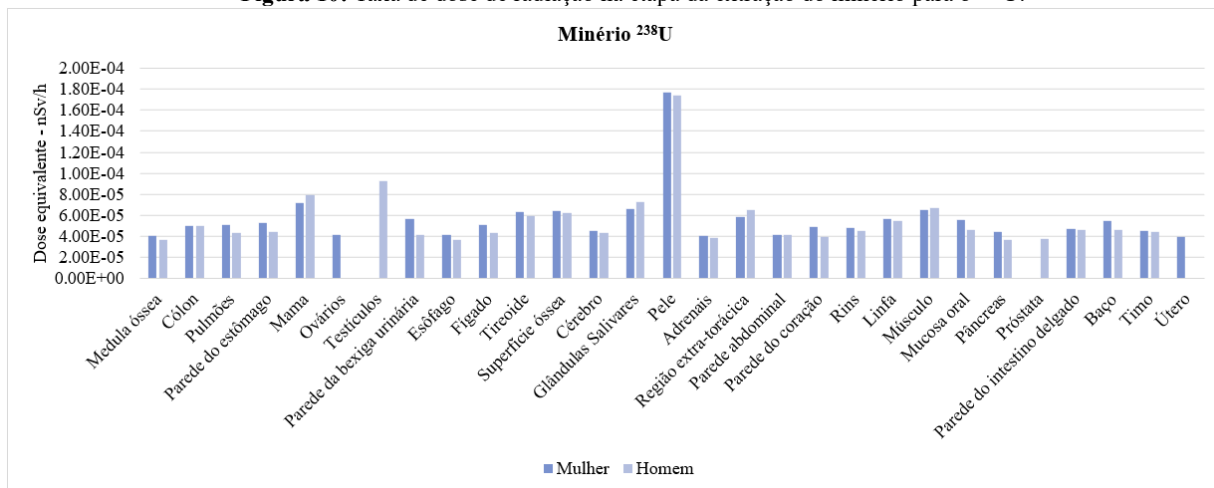
## 6. RESULTADOS

Após a simulação da fonte de radiação devido aos radionuclídeos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  no solo da mina de fosfato do Barreiro, e análise de seus efeitos sobre os órgãos dos simuladores antropomórficos, foram geradas tabelas para diferentes etapas do processo mineral.

A Figura 10 mostra a taxa de dose de radiação na extração do minério para o  $^{238}\text{U}$ . As taxas apresentam-se mais elevadas na pele, com valores de  $1,77 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para mulheres e  $1,74 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para homens. O segundo órgão mais afetado são os testículos, com uma taxa de  $9,23 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$ , seguido pela mama, que apresenta  $7,18 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$  em mulheres e  $7,92 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$  em

homens. De modo geral, observa-se que as mulheres são mais impactadas pela radiação de  $^{238}\text{U}$  na etapa de extração do minério em comparação aos homens.

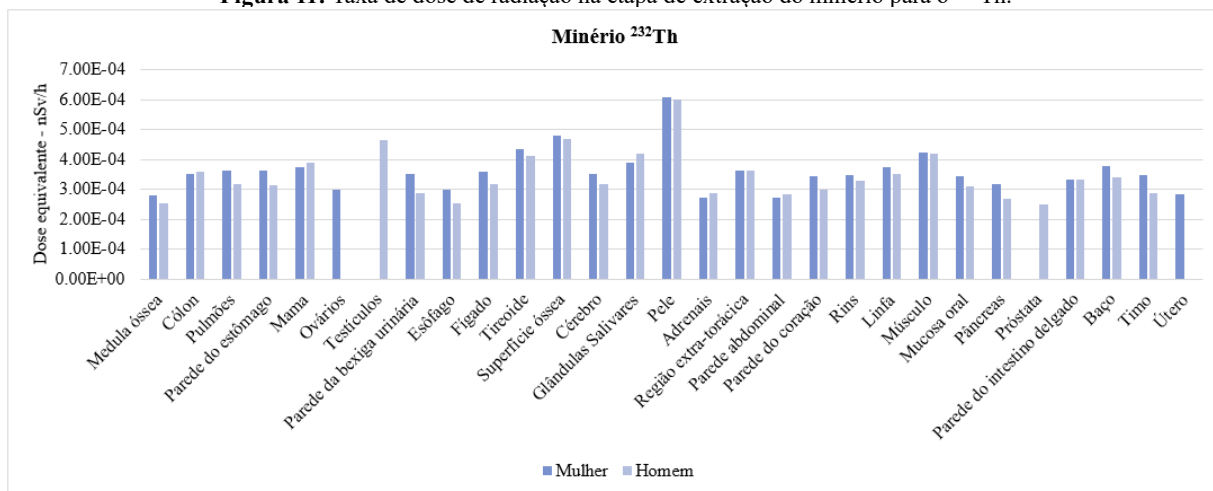
**Figura 10:** Taxa de dose de radiação na etapa da extração do minério para o  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: autoria própria.

A figura 11 apresenta a taxa de dose de radiação na extração do minério para o  $^{232}\text{Th}$  e os órgãos mais afetados. A pele também é o órgão mais afetado ( $6,09 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulher e  $6,01 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homem), seguido da superfície óssea ( $4,79 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulher e  $4,69 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homem), testículos ( $4,63 \times 10^4$ ) e músculos ( $4,22 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulher e  $4,19 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homem).

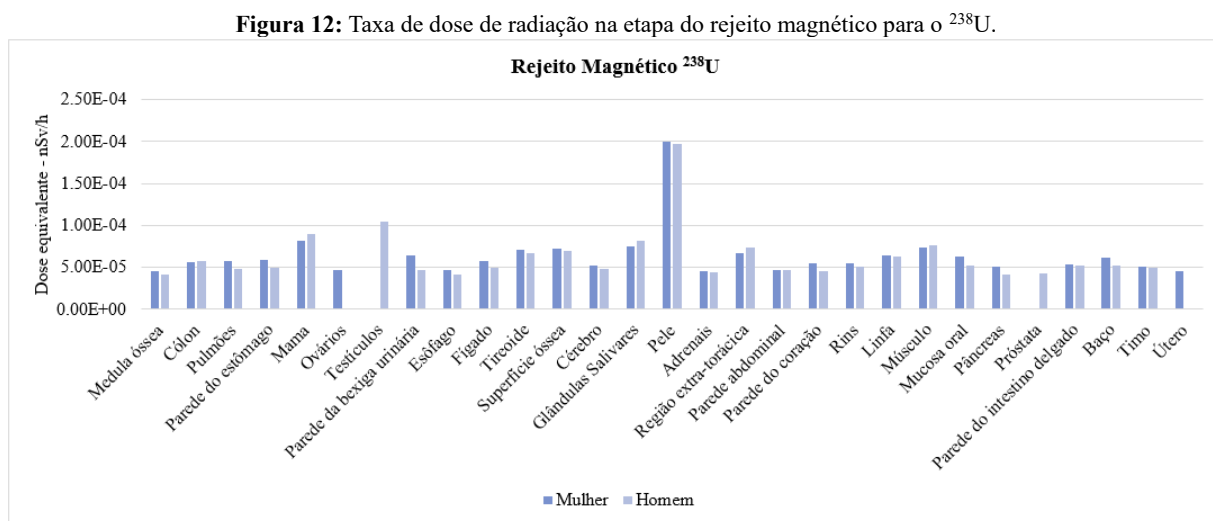
**Figura 11:** Taxa de dose de radiação na etapa de extração do minério para o  $^{232}\text{Th}$ .



Fonte: autoria própria.

## 6.1 Rejeito Magnético

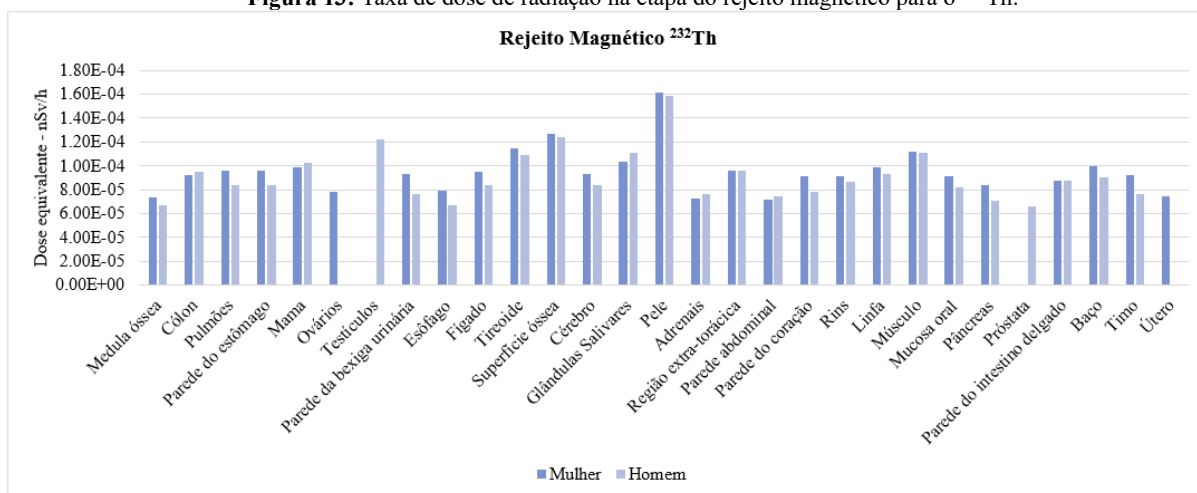
O rejeito magnético é o subproduto da etapa da separação magnética, na qual pode haver concentração de radionuclídeos como urânio e tório. A Figura 12 apresenta a taxa de dose de radiação para o  $^{238}\text{U}$ . O órgão mais afetado pela radiação nessa etapa é a pele, com valores de  $2,00 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para mulheres e  $1,97 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para homens, seguido pelos testículos ( $1,04 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ) e pelas mamas ( $8,13 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$  mulheres e  $8,97 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$  homens).



Fonte: autoria própria.

A taxa de dose para o radionuclídeo  $^{232}\text{Th}$  está representada na figura 13. A pele é órgão mais afetado pela exposição, com valores de  $1,61 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para mulheres e  $1,59 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para homens, seguido dos órgãos testículo ( $1,23 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ) e superfície óssea ( $1,27 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulher,  $1,24 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homem).

**Figura 13:** Taxa de dose de radiação na etapa do rejeito magnético para o  $^{232}\text{Th}$ .

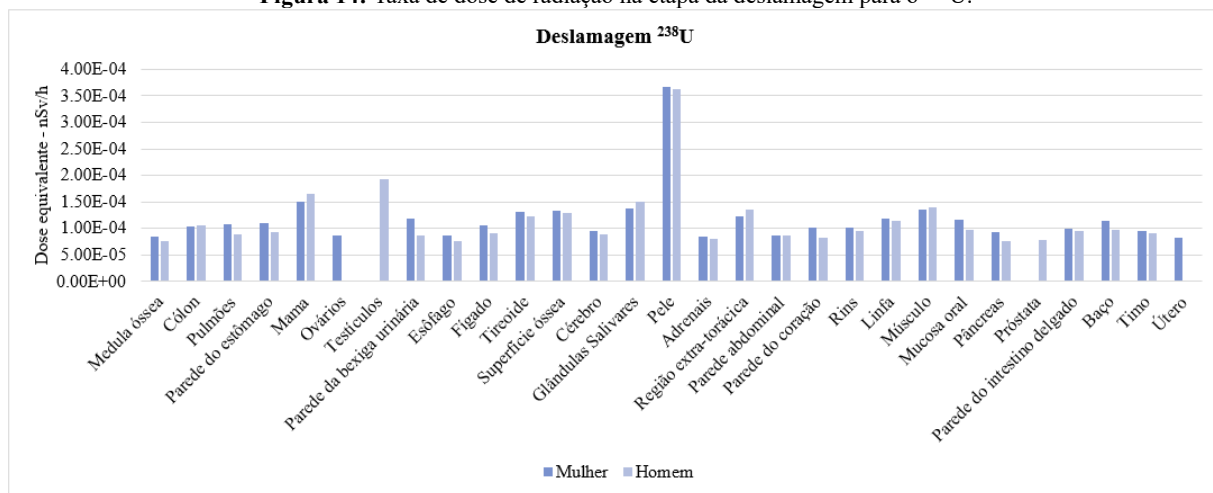


Fonte: autoria própria.

## 6.2 Deslamagem

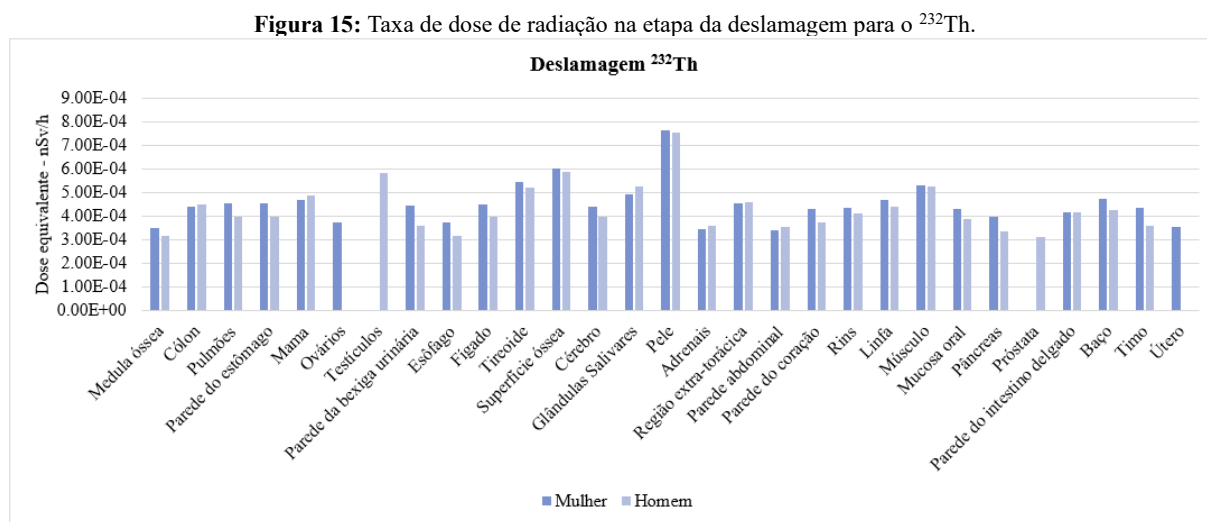
A deslamagem consiste na remoção de lama através de equipamentos deslamadores, fazendo com que não haja interferência de partículas muito finas na flotação. A figura 14 mostra a taxa de dose de radiação do  $^{238}\text{U}$  nos diferentes órgãos do corpo humano. Novamente a pele é o órgão mais exposto a radiação (mulheres:  $3,67 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ; homens:  $3,63 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ), seguido dos testículos ( $1,92 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ) e mama (mulheres:  $1,49 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ; homens:  $1,65 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ).

**Figura 14:** Taxa de dose de radiação na etapa da deslamagem para o  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: autoria própria.

Para o radionuclídeo  $^{232}\text{Th}$  (figura 15), o órgão que apresentou a maior taxa de dose de radiação foi a pele, com  $7,64 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulher e  $7,54 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homem. Posteriormente testículo ( $5,81 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ) e mama ( $4,68 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulher;  $4,88 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homem).

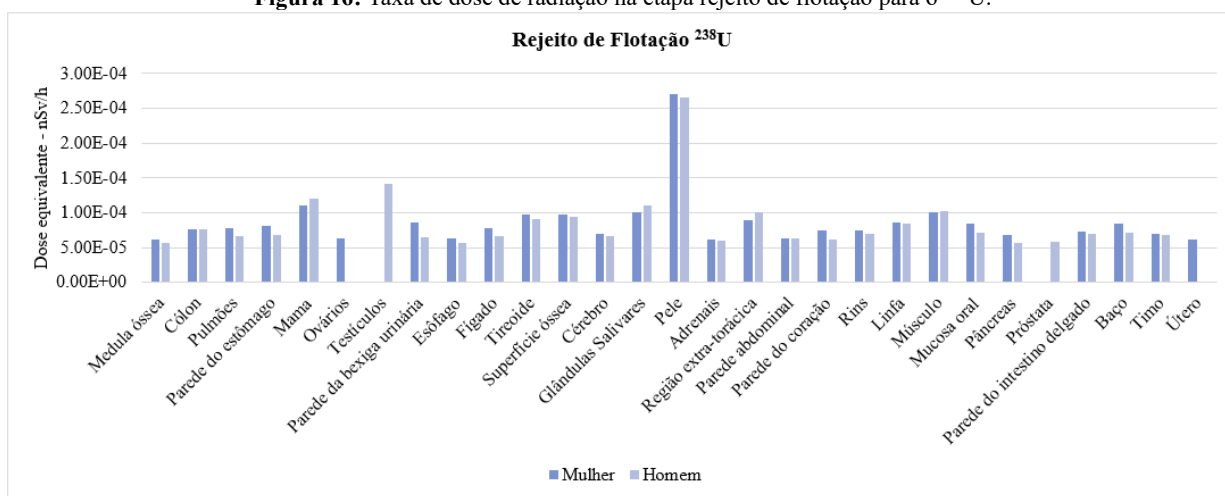


Fonte: autoria própria.

### 6.3 Rejeito de flotação

A flotação é um processo utilizado para separar minérios de diferentes teores. O rejeito de flotação refere-se ao material que não é aproveitado após a separação dos minerais. A radiação emitida pelo  $^{238}\text{U}$  durante o processo de flotação (figura 16) pode ter impactos significativos sobre a saúde dos trabalhadores que estão expostos a ela. A pele é o órgão mais afetado tanto em homens quanto em mulheres, com doses de  $2,0 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  e  $2,66 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  respectivamente. A seguir, os testículos ( $1,37 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ ) e as mamas em ambos os sexos ( $1,06 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  mulheres e  $1,17 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  homens).

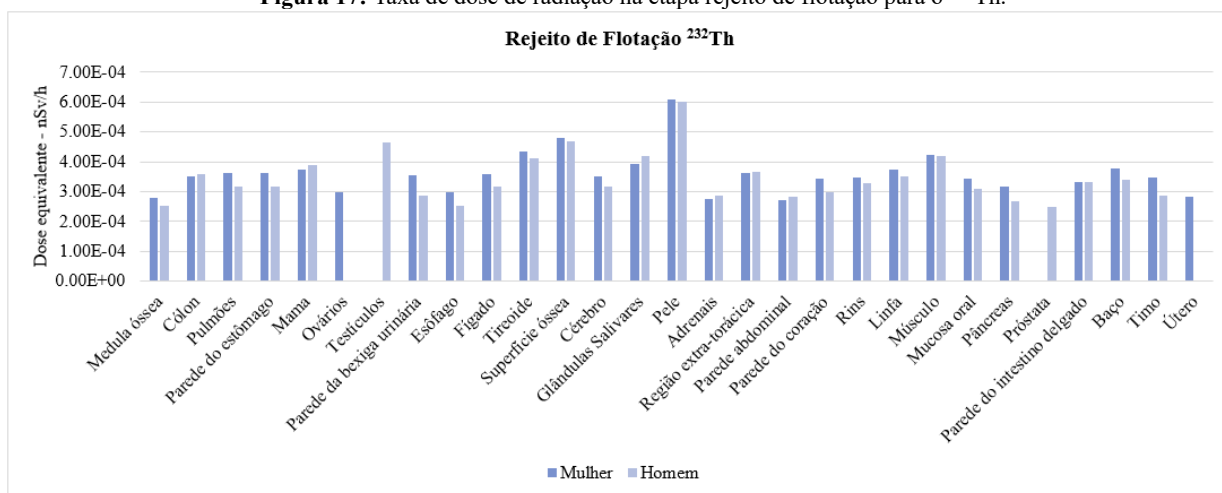
**Figura 16:** Taxa de dose de radiação na etapa rejeito de flotação para o  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: autoria própria.

A Figura 17 apresenta a taxa de dose de radiação proveniente do  $^{232}\text{Th}$ , demonstrando que os órgãos mais afetados são os mesmos observados no caso do  $^{238}\text{U}$ . A pele é o órgão mais exposto, com uma taxa de  $6,09 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para mulheres e  $6,01 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para homens. Em seguida, destacam-se os testículos, com uma dose de  $4,63 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ , e a superfície óssea, com valores de  $4,79 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para mulheres e  $4,69 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para homens.

**Figura 17:** Taxa de dose de radiação na etapa rejeito de flotação para o  $^{232}\text{Th}$ .

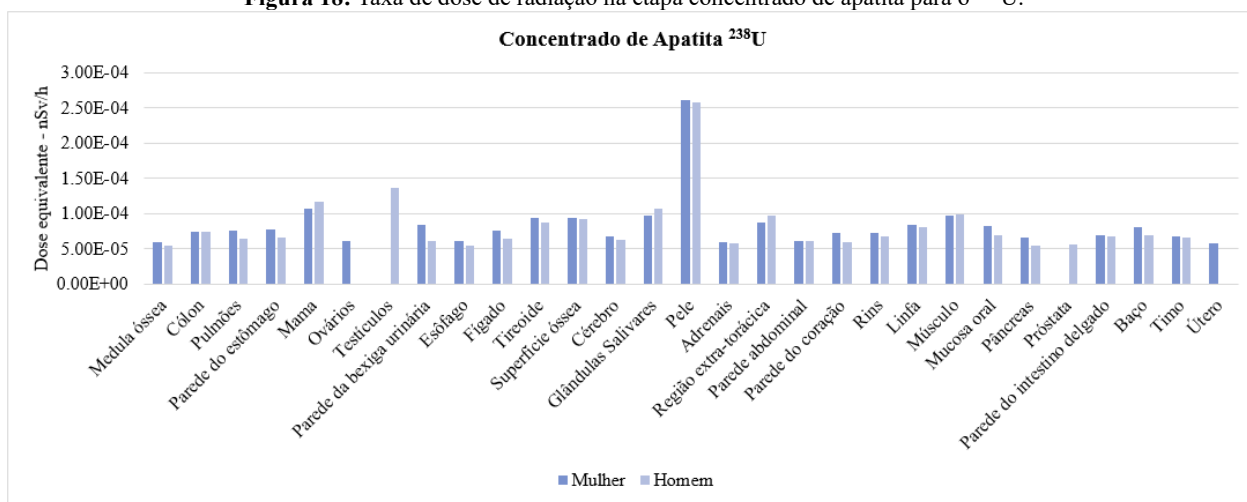


Fonte: autoria própria.

#### 6.4 Concentrado de apatita

A radiação emitida pelo radionuclídeo  $^{238}\text{U}$ , conforme mostrado na Figura 18, afeta principalmente a pele, com taxas de dose de  $2,62 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para mulheres e  $2,59 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  para homens. Os testículos são o segundo órgão mais impactado, com uma dose de  $1,37 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ , seguidos pelas mamas, com valores de  $1,06 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  em mulheres e  $1,17 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  em homens.

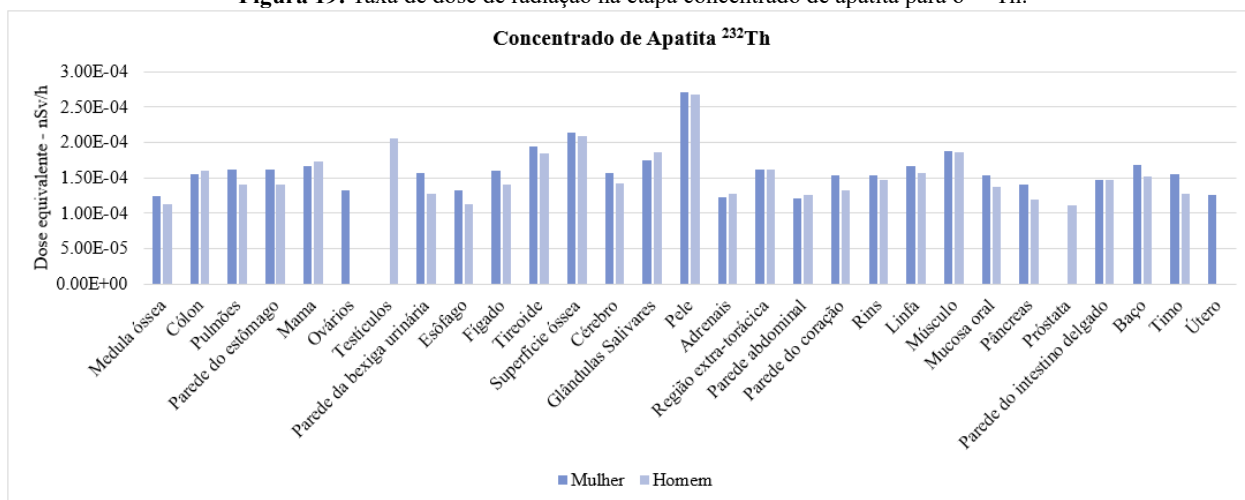
**Figura 18:** Taxa de dose de radiação na etapa concentrado de apatita para o  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: autoria própria.

O radionuclídeo  $^{232}\text{Th}$  apresenta como principal órgão afetado a pele, com uma taxa de dose de radiação de  $2,72 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  em mulheres e  $2,68 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  em homens. Em segundo lugar, observam-se os testículos, com uma dose de  $2,07 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$ , seguidos pela superfície óssea, com valores de  $2,14 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  em mulheres e  $2,09 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$  em homens (Figura 19).

**Figura 19:** Taxa de dose de radiação na etapa concentrado de apatita para o  $^{232}\text{Th}$ .



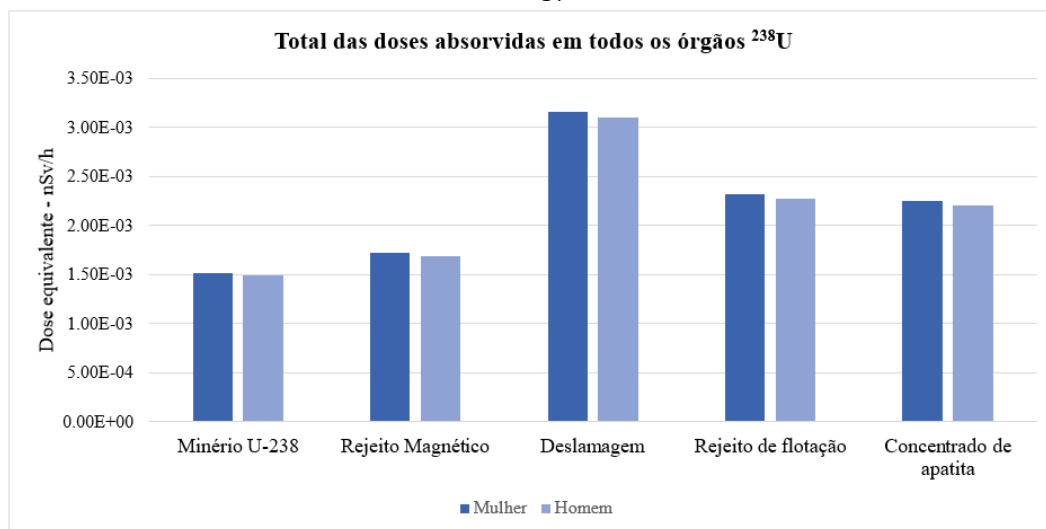
Fonte: autoria própria

## 7. DISCUSSÃO

A avaliação dosimétrica da exposição ocupacional na mineração de fosfato, utilizando simulações Monte Carlo, é uma área de pesquisa fundamental devido aos potenciais riscos à saúde associados à exposição a materiais radioativos de ocorrência natural (NORMs). Os resultados obtidos indicam que a pele é o órgão mais afetado tanto em mulheres quanto em homens, em todas as etapas do processo e para os radionuclídeos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . Essa predominância pode ser atribuída ao fato de que a pele é o órgão mais exposto durante todo o processo, desde a extração do minério até a produção do concentrado de apatita.

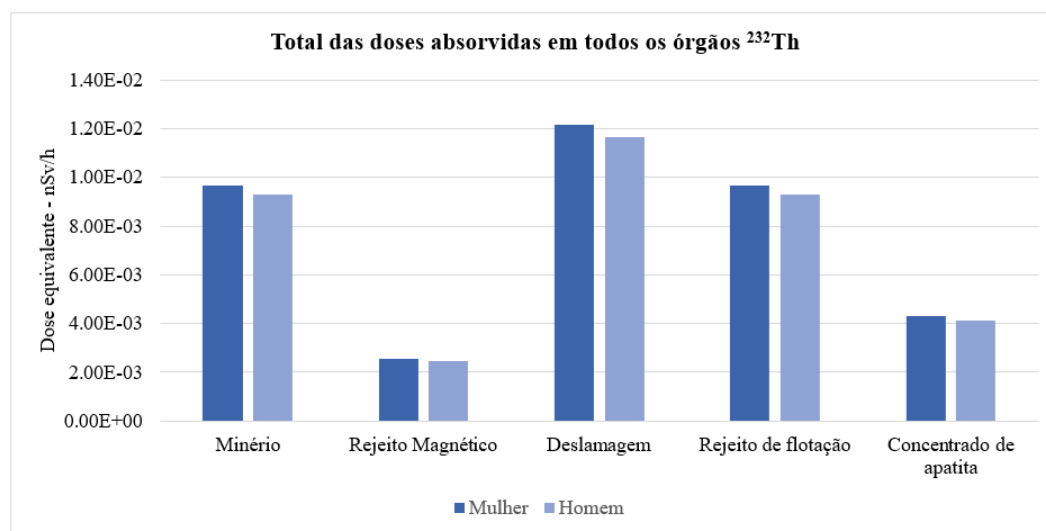
A fase de deslamagem é a que apresenta a maior incidência de radiação proveniente do  $^{238}\text{U}$ , enquanto a etapa de extração do minério apresenta a menor exposição (Figura 20). Durante a extração, os trabalhadores permanecem dentro de máquinas, o que contribui para reduzir a exposição à radiação. No caso do  $^{232}\text{Th}$ , a deslamagem também resulta em níveis mais elevados de radiação, em contraste com os valores mais baixos observados no rejeito magnético (Figura 21).

**Figura 20:** Gráfico comparativo das taxas totais de doses absorvidas por todos os órgãos nas diferentes etapas do processo para o  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: autoria própria.

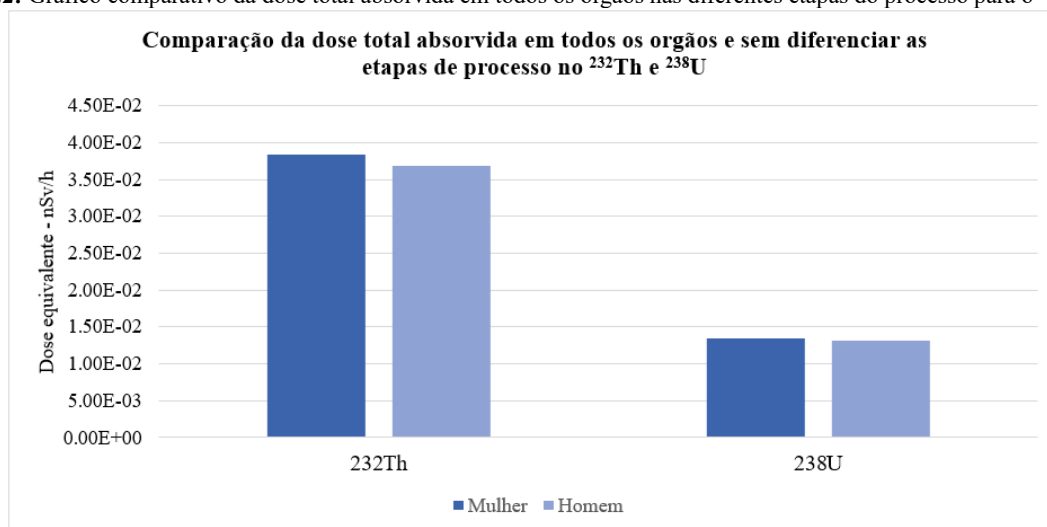
**Figura 21:** Gráfico comparativo das taxas totais de doses absorvidas por todos os órgãos nas diferentes etapas do processo para o  $^{232}\text{Th}$ .



Fonte: autoria própria.

As mulheres apresentam níveis mais elevados de exposição à radiação em comparação aos homens para ambos os radionuclídeos. Essa diferença pode ser explicada pela simulação do voxel feminino, que representa uma estatura e peso menores, posicionando o corpo mais próximo do solo, a fonte de radiação, o que resulta em maiores níveis de exposição (Figura 22).

**Figura 22:** Gráfico comparativo da dose total absorvida em todos os órgãos nas diferentes etapas do processo para o  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$ .



Fonte: autoria própria.

De acordo com os estudos de Pires do Rio (1999), os resultados obtidos neste trabalho são consistentes com os dela. O  $^{238}\text{U}$  apresentou maior concentração na etapa de deslamagem e menor concentração no minério, enquanto o  $^{232}\text{Th}$  mostrou concentrações mais elevadas na deslamagem e menores no rejeito magnético (Tabela 2). Em ambos os trabalhos, foram utilizados os mesmos cenários geológicos e as etapas da mineração, sendo simulado a mina de fosfato de Araxá – MG.

## 8. CONCLUSÃO

O trabalho ressalta os riscos críticos à saúde associados à mineração de fosfato, devido à presença NORMs, como  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . Esses radionuclídeos representam riscos significativos aos trabalhadores, exigindo avaliações dosimétricas completas para avaliar os possíveis impactos à saúde durante vários estágios das atividades de mineração.

A utilização do *software* EDC\_Viewer é muito importante para simulações dosimétricas, que são cruciais para entender como a radiação é absorvida pelo corpo humano. Essas simulações ajudam a identificar quais órgãos são mais afetados, sendo assim possível interferir para maior proteção dos trabalhadores.

Os dados mostram que os trabalhadores correm o risco de exposição à radiação, especialmente durante fases críticas, como a deslamagem, onde as concentrações de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  são maiores. Essa exposição a dose efetiva está dentro do limite permitido pela CNEN, porém, fiscalizações devem ser realizadas, pois exposições elevadas a radiação podem levar a graves consequências para a saúde, incluindo risco aumentado de câncer de pele e outras condições relacionadas, especialmente para mulheres que podem apresentar níveis mais altos de exposição.

É de suma importância que práticas de segurança rigorosas sejam aplicadas. O monitoramento e a avaliação contínuos dos níveis de radiação no local de trabalho são essenciais para proteger a saúde dos trabalhadores e garantir um ambiente de trabalho mais seguro.

## 9. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F, F.M. **Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil**. Revista Brasileira de Geociências. 16: 325-349. 1986
- ATSDR. **Toxicological Profile for Uranium**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999
- BARBOSA, E. S. R.; BROD, J. A.; JUNQUEIRA BROD, T. C.; DANTAS, E. L.; CORDEIRO, P. F. D.; GOMIDE, C. S. **Bebedourite from its type área (Salite I complex): A key petrogenetic series in the late Cretaceous Alto Paranaíba, kamafugite-carbonatite-phoscorite association**. Central Brasil, Lithos, 144: 56-72. 2012.
- BELCHIOR, A. L. V. **Contributo para um sistema de automação e robótica na fonte experimental de  $^{60}\text{Co}$ /ITN-Distribuição de dose por simulação Monte Carlo e sua validação por dosimetria física e química**. Dissertação (Mestrado) - 2007
- BIELAJEW, A. F. **Fundamentals of the Monte Carlo Method for Neutral and Charged Particle Transport**, department of nuclear engineering and radiological sciences, The University of Michigan. 1988
- BOLOGNA, M. S. **Investigação magnetotelúrica da litosfera na província ígnea do alto Paranaíba** / M. S. Bologna - São José dos Campos: INPE, 2001.
- BROD, J. A. **Petrology, and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State Brazil**. Ph. D. Thesis. University of Durham, Durham. UK. 486 pp. 1999.
- BROD, J.A., GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., JUNQUEIRA-BROD, T.C., SEER, H.J., MORAES, L.C., BOAVENTURA, G.R. **Kamafugite affinity of the Tapira alkaline-carbonatite complex (Minas Gerais, Brazil)**. Revista Brasileira de Geociências 30: 404-408. 2000.
- CETEM. FERREIRA, G. E.; ANDRADE, J. G. **Elaboração e avaliação econômica de projetos de mineração**. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- CORDEIRO, P. F. O; BROD, J. A; SANTOS, R. V; DANTAS, E. L; DE OLIVEIRA, C. G; BARBOSA, E. S. R. **Stable (C, O) and radiogenic (Sr, Nd) isotopes of carbonates as indicators of magmatic and post-magmatic processo os phoscorite-series rocks and carbonatites from Catalão I, central Brasil**. Contributions to Mineralogy and Petrology. 161 (3): 451-464. 2011

COSTA NETO, M. C. **Caracterização estrutural, metamórfica e geoquímica da zona interna da Faixa Brasília a sul de Goiânia** / Manoel Corrêa da Costa Neto. – Rio Claro : [s.n.], 2003

CRUZ, J. R., *et al.* **Caracterização Espectral do Depósito de Fosfato de Araxá (MG).** Anais...Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba, 2011. P 3530.

DANA, J. D. **Manual de mineralogia.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 642p. 1981

DARDENNE M.A. **The Brasília Fold Belt.** In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos. 2000. Tectonic evolution of South America. 31 st International Geological Congress, Rio de Janeiro, SBG. p. 231-263. 2000.

EISENBUD M. **Environmental radioactivity: from natural, industrial, and military sources.** 3a. Edição. New York: Academic Press, inc.: 1987.

FERNANDES, H. M.; PIRES RIO, M. A.; FRANKLIN, M. R. **Impactos radiológicos da indústria do fosfato.** Série estudos & documentos: CETEM, [s. l.], 2004.

FROLOV, A. A. **Vertical zonation in deposition of ore, as in ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites.** International Geology Review.13: 685-695. 1971

FUCK R. Q. **A Faixa Brasília E A Compartimentação Tectônica Na Província Tocantins.**In: Sbg, Simpósio De Geologia Do Centro-oeste 4. Atas, P.184-187. 1994

GRASSO, C. B. **Geologia e geometalurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo da mina do barreiro, Araxá.** Tese de doutorado (Geologia econômica e prospecção) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2015.

GRASSO, C.B., RIBEIRO, C.C., BROD, J. A., GASPAR, J.C. **Mapeamento Geológico de detalhe (1:2000) das frentes de lavra da mina da Fosfertil Fertilizantes Fosfatados S.A.** 43º Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju (CD-ROM). 2006.

HEINRICH, E.Wm.**The Geology of Carbonatites**, 607p. Rand Mc. Nally & Company. 1966.

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY), **Categorization of Radioactive Sources**, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9, IAEA, Vienna (2005).

IAEA (International Atomic Energy Agency). **Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation.** — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.

IAEA-INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data.** Vienna: [s. n.], 2004

ICRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION). **Dose coefficients for external exposures to environmental sources.** ICRP Publication 144. 2020

ICRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION) **Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers**, Publication 68, Pergamon Press, Oxford, and New York (1994).

ICRP 110. **International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 110, Adult Reference Computational Phantoms.** Annals of the ICRP, vol. 39(2), 2009.

LE MAITRE, R.W. **Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.** Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2002.

LEE, J. D. **Química inorgânica.** Um novo texto conciso. 3 ed. São Paulo; Edgard Bluecher, 1980.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. de M.; NASCIMENTO, M. **Agrominerais/Fosfato.** In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Ed(s)). Rochas e minerais Industriais. 1 a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. de M.; NASCIMENTO, M. **Fosfato.** In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Ed(s)). Rochas e minerais Industriais: Usos e Especificações. 5 a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 141-171.

MALINS, L.R. MITCHELL, J. N. LIU, X. THOMPSON, R. E. CHAN, B. RADOM, L. PAYNE, R. J. **Rapid Additive-Free Selenocystine–Selenoester Peptide Ligation.** Journal of the American Chemical Society. Vol 137/Issue 44. 2015.

MASON, B.H. **Princípios de Geoquímica,** Editora da USP / Ed. Polígono. 1971.

NASCIMENTO, A.C. **Complexo de Mineração de Tapira – mapeamento geológico-estrutural das frentes de lavra**. Relatório interno Vale Fertilizantes, Tapira, 17p. 2014

OLIVEIRA, I.W.B., SACHS, L.L.B., SILVA, V.A., BATISTA, I.H. **Folha SE.23-Belo Horizonte**. In: C. Schobbenhaus, J.H. Gonçalves, J.O.S. Santos, M.B. Abram, R. Leão Neto, G.M.M. Matos, R.M. Vidotti, M.A.B. Ramos, J.D.A. Jesus (Editors). Carta geológica do Brasil ao millionésimo: Sistema de Informações Geográficas – SIG e 46 folhas na escala 1: 1.000.000. Brasília: CPRM. 41 (CD-ROM). 2004

PALMIERI, M., FERRARI, A.J.D., BROD, J.A., BARBOSA, P.A.R. **Geologia da mina de fosfato da Copebrás no Complexo Foscorítico-Carbonatítico de Catalão I**. 43º Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Aracaju (CD-ROM). 2006.

PELOWITZ, D. B. (Editor). **MCNPXTM user's manual - version 2.6.0. LA-CP-07-1473**. Los alamos national security, LLC, 2008

PIRES DO RIO, M. A., AMARAL, E. C.S., FERNANDES, H. M. ROCHEDO, E. R. R. **Environmental impact associated with non-uranium mining industries: a proposal for screening criteria**. *Journal of environmental radioactivity* 59, 1-17. (2002)

PIRES DO RIO, M.A. **Indústrias de mineração não nucleares e o aumento da exposição à radiação natural**. Rio de Janeiro, UERJ, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, 1999.

RIBEIRO, C. C. **Geologia, geometalurgia, controle e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO**. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasil. 2008.

RIBEIRO, C. C; BROD, J. A; JUNQUEIRA-BROD, T. C; GASPAR, J. C; PALMIERI, M; CORDEIRO, P. F. O; TORRES, M. G; GRASSO, C. B; BARBOSA, E. S. R; BARBOSA, P. A. R; FERRARI, A. J. D; GOMIDE, C. S. **Potencial e controles metalogenéticos de ETR, Ti e Nb em províncias alcalino-carbonatíticas brasileiras. Metalogenia das Províncias tectônicas do Brasil**. CPRM, Brasília. 559-589. 2014.

RIVAS MDC. **Interactions between soil uranium contamination and fertilization with N, P and S on the uranium content and uptake of corn, sunflower and beans, and soil microbiological parameters**. FAL Agricultural Research Center of Germany Journal, 2005.

RODRIGUES, C.S., LIMA, P.R.A.S. **Complexos carbonatíticos do Brasil**. In: Complexos carbonatíticos do Brasil: Geologia. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração: 3-17. 1984.

SANTOS, B. L. DOS. **Petrologia e geologia estrutural da Faixa Brasília na região de Estrela do Sul-MG: Implicações Tectônicas**. p. 144, 2019.

SEER H.J. & DARDENNE M.A. **Tectonostratigraphic terrane analysis on Neoproterozoic times: the case study of the Araxá Synform, Minas Gerais, Brazil** - implications to the final collage of the Gondwanaland. Rev. Bras.Geoc., 30(1):78-81. 2000

SILVA, A.B. **Jazida de nióbio de Araxá, Minas Gerais**. In: Schobbenhaus, C. (Ed.). Principais depósitos minerais do Brasil. MME/DNPM, Brasília: 435-453. 1986.

SILVA, A.B., MARCHETTO, M., SOUZA, O.M. **Geologia do complexo carbonatítico de Araxá (Barreiro), MG**. Mineração e Metalurgia 415: 14-18. 1979.

SOUZA, A. E. de; FONSECA, D. S. **Fosfato**. DNPM. 2009

TEIXEIRA, L. F. L. **Determinação dos radionuclídeos naturais urânio e tório nos sedimentos superficiais do sistema Cananéia – Iguapé**. Tese de mestrado – Autarquia associada à universidade de São Paulo. 2017

TESTA, F.G, **Avanço na flotação de finos de minérios com condicionamento de alta intensidade**, Porto Alegre, UFRGS, 2008

TORRES M. G. **Caracterização mineralógica do minério fosfático da mina da Arafertil S. A., no complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil. 1996.

TORRES, M.G., GASPAR, J.C. **Geoquímica do manto de intemperismo da mina de fosfato do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG**. V Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Niteroi. Resumos expandidos (CD-ROM). 1995a.

TORRES, M.G., GASPAR, J.C. **Estudo mineralógico dos veios de apatita e magnetita do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Mineração Arafertil, Araxá, MG**. V Congresso

Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Niterói. Resumos expandidos (CD-ROM). 1995b.

TRAVERSA, G., GOMES, C.B., BROTZU, P., BURAGLINI, N., MORBIDELLI, L., **Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil)**. Anais da Academia Brasileira de Ciências 73: 71-98.2001.

TRÖGER, E. ALKALIGESTEINE. **Serra do Salitre im westlichen Minas Geraes, Brasilien**. Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abt A: 202-204. 1928.

UHLEIN, A.; FONSECA, M. A.; SEER, H. J.; DARDENNE, M. A. **Tectônica Da Faixa De Dobramentos Brasília – Setores Setentrional E Meridional**. Geonomos, V. 20, P. 1-14. 2012.

UMISEDÓ, N.K. **Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas**. Tese de doutorado – USP. São Paulo, 2007.

UNSCEAR-UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Sources and effects of ionizing radiation**. United Nations, New York:UNSCEAR Report, 2000.

YEGOROV, L.S. **Phoscorites of the Maymecha-Kotuy ijolite-carbonatite association**. International Geological Reviews 35: 346-358. 1993.

## 10. ANEXOS

### 10.1 Anexo A - Doses efetivas $^{238}\text{U}$

**Tabela 5:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no minério  $^{238}\text{U}$ .

| <b>Minério <math>^{238}\text{U}</math></b> |                                  |          |           |          |
|--------------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                                     | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                            | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                               | 7.15E-08                         | 6.43E-08 | 4.08E-05  | 3.67E-05 |
| Cólon                                      | 8.75E-08                         | 8.83E-08 | 4.99E-05  | 5.03E-05 |
| Pulmões                                    | 9.02E-08                         | 7.56E-08 | 5.14E-05  | 4.31E-05 |
| Parede do estômago                         | 9.23E-08                         | 7.77E-08 | 5.26E-05  | 4.43E-05 |
| Mama                                       | 1.26E-07                         | 1.39E-07 | 7.18E-05  | 7.92E-05 |
| Ovários                                    | 7.26E-08                         | 0        | 4.14E-05  | 0.00E+00 |
| Testículos                                 | 0                                | 1.62E-07 | 0.00E+00  | 9.23E-05 |
| Parede da bexiga urinária                  | 9.95E-08                         | 7.36E-08 | 5.67E-05  | 4.20E-05 |
| Esôfago                                    | 7.34E-08                         | 6.49E-08 | 4.18E-05  | 3.70E-05 |
| Fígado                                     | 9.00E-08                         | 7.69E-08 | 5.13E-05  | 4.38E-05 |
| Tireoide                                   | 1.11E-07                         | 1.04E-07 | 6.33E-05  | 5.93E-05 |
| Superfície óssea                           | 1.12E-07                         | 1.09E-07 | 6.38E-05  | 6.21E-05 |
| Cérebro                                    | 8.01E-08                         | 7.55E-08 | 4.57E-05  | 4.30E-05 |
| Glândulas Salivares                        | 1.16E-07                         | 1.27E-07 | 6.61E-05  | 7.24E-05 |
| Pele                                       | 3.10E-07                         | 3.06E-07 | 1.77E-04  | 1.74E-04 |
| Adrenais                                   | 7.08E-08                         | 6.84E-08 | 4.04E-05  | 3.90E-05 |
| Região extra-torácica                      | 1.03E-07                         | 1.15E-07 | 5.87E-05  | 6.56E-05 |
| Parede abdominal                           | 7.23E-08                         | 7.24E-08 | 4.12E-05  | 4.13E-05 |
| Parede do coração                          | 8.59E-08                         | 7.00E-08 | 4.90E-05  | 3.99E-05 |
| Rins                                       | 8.53E-08                         | 7.95E-08 | 4.86E-05  | 4.53E-05 |
| Linfa                                      | 9.96E-08                         | 9.68E-08 | 5.68E-05  | 5.52E-05 |
| Musculo                                    | 1.15E-07                         | 1.18E-07 | 6.56E-05  | 6.73E-05 |
| Mucosa oral                                | 9.76E-08                         | 8.16E-08 | 5.56E-05  | 4.65E-05 |
| Pâncreas                                   | 7.86E-08                         | 6.49E-08 | 4.48E-05  | 3.70E-05 |
| Próstata                                   | 0                                | 6.60E-08 | 0.00E+00  | 3.76E-05 |
| Parede do intestino delgado                | 8.33E-08                         | 8.08E-08 | 4.75E-05  | 4.61E-05 |
| Baço                                       | 9.61E-08                         | 8.18E-08 | 5.48E-05  | 4.66E-05 |
| Timo                                       | 7.97E-08                         | 7.75E-08 | 4.54E-05  | 4.42E-05 |
| Útero                                      | 6.97E-08                         | 0        | 3.97E-05  | 0.00E+00 |

**Tabela 6:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito magnético  $^{238}\text{U}$ .

| Rejeito Magnético $^{238}\text{U}$ |                                  |          |           |          |
|------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                             | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                    | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                       | 7.15E-08                         | 6.43E-08 | 4.61E-05  | 4.15E-05 |
| Cólon                              | 8.75E-08                         | 8.83E-08 | 5.64E-05  | 5.70E-05 |
| Pulmões                            | 9.02E-08                         | 7.56E-08 | 5.82E-05  | 4.88E-05 |
| Parede do estômago                 | 9.23E-08                         | 7.77E-08 | 5.95E-05  | 5.01E-05 |
| Mama                               | 1.26E-07                         | 1.39E-07 | 8.13E-05  | 8.97E-05 |
| Ovários                            | 7.26E-08                         | 0        | 4.68E-05  | 0.00E+00 |
| Testículos                         | 0                                | 1.62E-07 | 0.00E+00  | 1.04E-04 |
| Parede da bexiga urinária          | 9.95E-08                         | 7.36E-08 | 6.42E-05  | 4.75E-05 |
| Esôfago                            | 7.34E-08                         | 6.49E-08 | 4.73E-05  | 4.19E-05 |
| Fígado                             | 9.00E-08                         | 7.69E-08 | 5.81E-05  | 4.96E-05 |
| Tireoide                           | 1.11E-07                         | 1.04E-07 | 7.16E-05  | 6.71E-05 |
| Superfície óssea                   | 1.12E-07                         | 1.09E-07 | 7.22E-05  | 7.03E-05 |
| Cérebro                            | 8.01E-08                         | 7.55E-08 | 5.17E-05  | 4.87E-05 |
| Glândulas Salivares                | 1.16E-07                         | 1.27E-07 | 7.48E-05  | 8.19E-05 |
| Pele                               | 3.10E-07                         | 3.06E-07 | 2.00E-04  | 1.97E-04 |
| Adrenais                           | 7.08E-08                         | 6.84E-08 | 4.57E-05  | 4.41E-05 |
| Região extra-torácica              | 1.03E-07                         | 1.15E-07 | 6.64E-05  | 7.42E-05 |
| Parede abdominal                   | 7.23E-08                         | 7.24E-08 | 4.66E-05  | 4.67E-05 |
| Parede do coração                  | 8.59E-08                         | 7.00E-08 | 5.54E-05  | 4.52E-05 |
| Rins                               | 8.53E-08                         | 7.95E-08 | 5.50E-05  | 5.13E-05 |
| Linfa                              | 9.96E-08                         | 9.68E-08 | 6.42E-05  | 6.24E-05 |
| Musculo                            | 1.15E-07                         | 1.18E-07 | 7.42E-05  | 7.61E-05 |
| Mucosa oral                        | 9.76E-08                         | 8.16E-08 | 6.30E-05  | 5.26E-05 |
| Pâncreas                           | 7.86E-08                         | 6.49E-08 | 5.07E-05  | 4.19E-05 |
| Próstata                           | 0                                | 6.60E-08 | 0.00E+00  | 4.26E-05 |
| Parede do intestino delgado        | 8.33E-08                         | 8.08E-08 | 5.37E-05  | 5.21E-05 |
| Baço                               | 9.61E-08                         | 8.18E-08 | 6.20E-05  | 5.28E-05 |
| Timo                               | 7.97E-08                         | 7.75E-08 | 5.14E-05  | 5.00E-05 |
| Útero                              | 6.97E-08                         | 0        | 4.50E-05  | 0.00E+00 |

**Tabela 7:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, na deslamagem  $^{238}\text{U}$ .

| Deslamagem $^{238}\text{U}$ |                                  |          |           |          |
|-----------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                      | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                             | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                | 7.15E-08                         | 6.43E-08 | 8.47E-05  | 7.62E-05 |
| Cólon                       | 8.75E-08                         | 8.83E-08 | 1.04E-04  | 1.05E-04 |
| Pulmões                     | 9.02E-08                         | 7.56E-08 | 1.07E-04  | 8.96E-05 |
| Parede do estômago          | 9.23E-08                         | 7.77E-08 | 1.09E-04  | 9.21E-05 |
| Mama                        | 1.26E-07                         | 1.39E-07 | 1.49E-04  | 1.65E-04 |
| Ovários                     | 7.26E-08                         | 0        | 8.60E-05  | 0.00E+00 |
| Testículos                  | 0                                | 1.62E-07 | 0.00E+00  | 1.92E-04 |
| Parede da bexiga urinária   | 9.95E-08                         | 7.36E-08 | 1.18E-04  | 8.72E-05 |
| Esôfago                     | 7.34E-08                         | 6.49E-08 | 8.70E-05  | 7.69E-05 |
| Fígado                      | 9.00E-08                         | 7.69E-08 | 1.07E-04  | 9.11E-05 |
| Tireoide                    | 1.11E-07                         | 1.04E-07 | 1.32E-04  | 1.23E-04 |
| Superfície óssea            | 1.12E-07                         | 1.09E-07 | 1.33E-04  | 1.29E-04 |
| Cérebro                     | 8.01E-08                         | 7.55E-08 | 9.49E-05  | 8.95E-05 |
| Glândulas Salivares         | 1.16E-07                         | 1.27E-07 | 1.37E-04  | 1.50E-04 |
| Pele                        | 3.10E-07                         | 3.06E-07 | 3.67E-04  | 3.63E-04 |
| Adrenais                    | 7.08E-08                         | 6.84E-08 | 8.39E-05  | 8.11E-05 |
| Região extra-torácica       | 1.03E-07                         | 1.15E-07 | 1.22E-04  | 1.36E-04 |
| Parede abdominal            | 7.23E-08                         | 7.24E-08 | 8.57E-05  | 8.58E-05 |
| Parede do coração           | 8.59E-08                         | 7.00E-08 | 1.02E-04  | 8.30E-05 |
| Rins                        | 8.53E-08                         | 7.95E-08 | 1.01E-04  | 9.42E-05 |
| Linfá                       | 9.96E-08                         | 9.68E-08 | 1.18E-04  | 1.15E-04 |
| Musculo                     | 1.15E-07                         | 1.18E-07 | 1.36E-04  | 1.40E-04 |
| Mucosa oral                 | 9.76E-08                         | 8.16E-08 | 1.16E-04  | 9.67E-05 |
| Pâncreas                    | 7.86E-08                         | 6.49E-08 | 9.31E-05  | 7.69E-05 |
| Próstata                    | 0                                | 6.60E-08 | 0.00E+00  | 7.82E-05 |
| Parede do intestino delgado | 8.33E-08                         | 8.08E-08 | 9.87E-05  | 9.57E-05 |
| Baço                        | 9.61E-08                         | 8.18E-08 | 1.14E-04  | 9.69E-05 |
| Timo                        | 7.97E-08                         | 7.75E-08 | 9.44E-05  | 9.18E-05 |
| Útero                       | 6.97E-08                         | 0        | 8.26E-05  | 0.00E+00 |

**Tabela 8:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito de flotação  $^{238}\text{U}$ .

| Rejeito de Flotação $^{238}\text{U}$ |                                  |          |           |          |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                               | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                      | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                         | 2.74E-07                         | 2.47E-07 | 6.22E-05  | 5.59E-05 |
| Cólon                                | 3.43E-07                         | 3.51E-07 | 7.61E-05  | 7.68E-05 |
| Pulmões                              | 3.56E-07                         | 3.10E-07 | 7.85E-05  | 6.58E-05 |
| Parede do estômago                   | 3.56E-07                         | 3.09E-07 | 8.03E-05  | 6.76E-05 |
| Mama                                 | 3.66E-07                         | 3.81E-07 | 1.10E-04  | 1.21E-04 |
| Ovários                              | 2.91E-07                         | 0        | 6.32E-05  | 0.00E+00 |
| Testículos                           | 0                                | 4.54E-07 | 0.00E+00  | 1.41E-04 |
| Parede da bexiga urinária            | 3.46E-07                         | 2.82E-07 | 8.66E-05  | 6.40E-05 |
| Esôfago                              | 2.93E-07                         | 2.47E-07 | 6.39E-05  | 5.65E-05 |
| Fígado                               | 3.52E-07                         | 3.10E-07 | 7.83E-05  | 6.69E-05 |
| Tireoide                             | 4.26E-07                         | 4.05E-07 | 9.66E-05  | 9.05E-05 |
| Superfície óssea                     | 4.70E-07                         | 4.60E-07 | 9.74E-05  | 9.48E-05 |
| Cérebro                              | 3.44E-07                         | 3.11E-07 | 6.97E-05  | 6.57E-05 |
| Glândulas Salivares                  | 3.83E-07                         | 4.11E-07 | 1.01E-04  | 1.10E-04 |
| Pele                                 | 5.97E-07                         | 5.89E-07 | 2.70E-04  | 2.66E-04 |
| Adrenais                             | 2.68E-07                         | 2.82E-07 | 6.16E-05  | 5.95E-05 |
| Região extra-torácica                | 3.54E-07                         | 3.57E-07 | 8.96E-05  | 1.00E-04 |
| Parede abdominal                     | 2.67E-07                         | 2.77E-07 | 6.29E-05  | 6.30E-05 |
| Parede do coração                    | 3.37E-07                         | 2.91E-07 | 7.47E-05  | 6.09E-05 |
| Rins                                 | 3.39E-07                         | 3.22E-07 | 7.42E-05  | 6.92E-05 |
| Linfa                                | 3.66E-07                         | 3.44E-07 | 8.67E-05  | 8.42E-05 |
| Musculo                              | 4.14E-07                         | 4.11E-07 | 1.00E-04  | 1.03E-04 |
| Mucosa oral                          | 3.37E-07                         | 3.02E-07 | 8.49E-05  | 7.10E-05 |
| Pâncreas                             | 3.10E-07                         | 2.63E-07 | 6.84E-05  | 5.65E-05 |
| Próstata                             | 0                                | 2.45E-07 | 0.00E+00  | 5.74E-05 |
| Parede do intestino delgado          | 3.25E-07                         | 3.24E-07 | 7.25E-05  | 7.03E-05 |
| Baço                                 | 3.70E-07                         | 3.34E-07 | 8.36E-05  | 7.12E-05 |
| Timo                                 | 3.40E-07                         | 2.82E-07 | 6.93E-05  | 6.74E-05 |
| Útero                                | 2.76E-07                         | 0        | 6.06E-05  | 0.00E+00 |

**Tabela 9:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no concentrado de apatita  $^{238}\text{U}$ .

| Concentrado de Apatita $^{238}\text{U}$ |                                  |          |           |          |
|-----------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                                  | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                         | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                            | 7.15E-08                         | 6.43E-08 | 6.04E-05  | 5.43E-05 |
| Cólon                                   | 8.75E-08                         | 8.83E-08 | 7.39E-05  | 7.46E-05 |
| Pulmões                                 | 9.02E-08                         | 7.56E-08 | 7.62E-05  | 6.39E-05 |
| Parede do estômago                      | 9.23E-08                         | 7.77E-08 | 7.80E-05  | 6.57E-05 |
| Mama                                    | 1.26E-07                         | 1.39E-07 | 1.06E-04  | 1.17E-04 |
| Ovários                                 | 7.26E-08                         | 0        | 6.13E-05  | 0.00E+00 |
| Testículos                              | 0                                | 1.62E-07 | 0.00E+00  | 1.37E-04 |
| Parede da bexiga urinária               | 9.95E-08                         | 7.36E-08 | 8.41E-05  | 6.22E-05 |
| Esôfago                                 | 7.34E-08                         | 6.49E-08 | 6.20E-05  | 5.48E-05 |
| Fígado                                  | 9.00E-08                         | 7.69E-08 | 7.61E-05  | 6.50E-05 |
| Tireoide                                | 1.11E-07                         | 1.04E-07 | 9.38E-05  | 8.79E-05 |
| Superfície óssea                        | 1.12E-07                         | 1.09E-07 | 9.46E-05  | 9.21E-05 |
| Cérebro                                 | 8.01E-08                         | 7.55E-08 | 6.77E-05  | 6.38E-05 |
| Glândulas Salivares                     | 1.16E-07                         | 1.27E-07 | 9.80E-05  | 1.07E-04 |
| Pele                                    | 3.10E-07                         | 3.06E-07 | 2.62E-04  | 2.59E-04 |
| Adrenais                                | 7.08E-08                         | 6.84E-08 | 5.98E-05  | 5.78E-05 |
| Região extra-torácica                   | 1.03E-07                         | 1.15E-07 | 8.70E-05  | 9.72E-05 |
| Parede abdominal                        | 7.23E-08                         | 7.24E-08 | 6.11E-05  | 6.12E-05 |
| Parede do coração                       | 8.59E-08                         | 7.00E-08 | 7.26E-05  | 5.92E-05 |
| Rins                                    | 8.53E-08                         | 7.95E-08 | 7.21E-05  | 6.72E-05 |
| Língua                                  | 9.96E-08                         | 9.68E-08 | 8.42E-05  | 8.18E-05 |
| Músculo                                 | 1.15E-07                         | 1.18E-07 | 9.72E-05  | 9.97E-05 |
| Mucosa oral                             | 9.76E-08                         | 8.16E-08 | 8.25E-05  | 6.90E-05 |
| Pâncreas                                | 7.86E-08                         | 6.49E-08 | 6.64E-05  | 5.48E-05 |
| Próstata                                | 0                                | 6.60E-08 | 0.00E+00  | 5.58E-05 |
| Parede do intestino delgado             | 8.33E-08                         | 8.08E-08 | 7.04E-05  | 6.83E-05 |
| Baço                                    | 9.61E-08                         | 8.18E-08 | 8.12E-05  | 6.91E-05 |
| Tímolo                                  | 7.97E-08                         | 7.75E-08 | 6.73E-05  | 6.55E-05 |
| Útero                                   | 6.97E-08                         | 0        | 5.89E-05  | 0.00E+00 |

## 10.2 Anexo B - Doses efetivas $^{232}\text{Th}$

**Tabela 10:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no minério  $^{232}\text{Th}$ .

| Minério $^{232}\text{Th}$   |                                  |          |           |          |
|-----------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Órgãos                      | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                             | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                | 2.74E-07                         | 2.47E-07 | 2.79E-04  | 2.52E-04 |
| Cólon                       | 3.43E-07                         | 3.51E-07 | 3.50E-04  | 3.58E-04 |
| Pulmões                     | 3.56E-07                         | 3.10E-07 | 3.63E-04  | 3.16E-04 |
| Parede do estômago          | 3.56E-07                         | 3.09E-07 | 3.63E-04  | 3.15E-04 |
| Mama                        | 3.66E-07                         | 3.81E-07 | 3.73E-04  | 3.89E-04 |
| Ovários                     | 2.91E-07                         | 0        | 2.97E-04  | 0.00E+00 |
| Testículos                  | 0                                | 4.54E-07 | 0.00E+00  | 4.63E-04 |
| Parede da bexiga urinária   | 3.46E-07                         | 2.82E-07 | 3.53E-04  | 2.88E-04 |
| Esôfago                     | 2.93E-07                         | 2.47E-07 | 2.99E-04  | 2.52E-04 |
| Fígado                      | 3.52E-07                         | 3.10E-07 | 3.59E-04  | 3.16E-04 |
| Tireoide                    | 4.26E-07                         | 4.05E-07 | 4.35E-04  | 4.13E-04 |
| Superfície óssea            | 4.70E-07                         | 4.60E-07 | 4.79E-04  | 4.69E-04 |
| Cérebro                     | 3.44E-07                         | 3.11E-07 | 3.51E-04  | 3.17E-04 |
| Glândulas Salivares         | 3.83E-07                         | 4.11E-07 | 3.91E-04  | 4.19E-04 |
| Pele                        | 5.97E-07                         | 5.89E-07 | 6.09E-04  | 6.01E-04 |
| Adrenais                    | 2.68E-07                         | 2.82E-07 | 2.73E-04  | 2.88E-04 |
| Região extra-torácica       | 3.54E-07                         | 3.57E-07 | 3.61E-04  | 3.64E-04 |
| Parede abdominal            | 2.67E-07                         | 2.77E-07 | 2.72E-04  | 2.83E-04 |
| Parede do coração           | 3.37E-07                         | 2.91E-07 | 3.44E-04  | 2.97E-04 |
| Rins                        | 3.39E-07                         | 3.22E-07 | 3.46E-04  | 3.28E-04 |
| Linfa                       | 3.66E-07                         | 3.44E-07 | 3.73E-04  | 3.51E-04 |
| Musculo                     | 4.14E-07                         | 4.11E-07 | 4.22E-04  | 4.19E-04 |
| Mucosa oral                 | 3.37E-07                         | 3.02E-07 | 3.44E-04  | 3.08E-04 |
| Pâncreas                    | 3.10E-07                         | 2.63E-07 | 3.16E-04  | 2.68E-04 |
| Próstata                    | 0                                | 2.45E-07 | 0.00E+00  | 2.50E-04 |
| Parede do intestino delgado | 3.25E-07                         | 3.24E-07 | 3.32E-04  | 3.30E-04 |
| Baço                        | 3.70E-07                         | 3.34E-07 | 3.77E-04  | 3.41E-04 |
| Timo                        | 3.40E-07                         | 2.82E-07 | 3.47E-04  | 2.88E-04 |
| Útero                       | 2.76E-07                         | 0        | 2.82E-04  | 0.00E+00 |

**Tabela 11:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito magnético  $^{232}\text{Th}$ .

| Rejeito Magnético $^{232}\text{Th}$ |                                  |          |           |          |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                              | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                     | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                        | 2.74E-07                         | 2.47E-07 | 7.40E-05  | 6.67E-05 |
| Cólon                               | 3.43E-07                         | 3.51E-07 | 9.26E-05  | 9.48E-05 |
| Pulmões                             | 3.56E-07                         | 3.10E-07 | 9.61E-05  | 8.37E-05 |
| Parede do estômago                  | 3.56E-07                         | 3.09E-07 | 9.61E-05  | 8.34E-05 |
| Mama                                | 3.66E-07                         | 3.81E-07 | 9.88E-05  | 1.03E-04 |
| Ovários                             | 2.91E-07                         | 0        | 7.86E-05  | 0.00E+00 |
| Testículos                          | 0                                | 4.54E-07 | 0.00E+00  | 1.23E-04 |
| Parede da bexiga urinária           | 3.46E-07                         | 2.82E-07 | 9.34E-05  | 7.61E-05 |
| Esôfago                             | 2.93E-07                         | 2.47E-07 | 7.91E-05  | 6.67E-05 |
| Fígado                              | 3.52E-07                         | 3.10E-07 | 9.50E-05  | 8.37E-05 |
| Tireoide                            | 4.26E-07                         | 4.05E-07 | 1.15E-04  | 1.09E-04 |
| Superfície óssea                    | 4.70E-07                         | 4.60E-07 | 1.27E-04  | 1.24E-04 |
| Cérebro                             | 3.44E-07                         | 3.11E-07 | 9.29E-05  | 8.40E-05 |
| Glândulas Salivares                 | 3.83E-07                         | 4.11E-07 | 1.03E-04  | 1.11E-04 |
| Pele                                | 5.97E-07                         | 5.89E-07 | 1.61E-04  | 1.59E-04 |
| Adrenais                            | 2.68E-07                         | 2.82E-07 | 7.24E-05  | 7.61E-05 |
| Região extra-torácica               | 3.54E-07                         | 3.57E-07 | 9.56E-05  | 9.64E-05 |
| Parede abdominal                    | 2.67E-07                         | 2.77E-07 | 7.21E-05  | 7.48E-05 |
| Parede do coração                   | 3.37E-07                         | 2.91E-07 | 9.10E-05  | 7.86E-05 |
| Rins                                | 3.39E-07                         | 3.22E-07 | 9.15E-05  | 8.69E-05 |
| Linfa                               | 3.66E-07                         | 3.44E-07 | 9.88E-05  | 9.29E-05 |
| Músculo                             | 4.14E-07                         | 4.11E-07 | 1.12E-04  | 1.11E-04 |
| Mucosa oral                         | 3.37E-07                         | 3.02E-07 | 9.10E-05  | 8.15E-05 |
| Pâncreas                            | 3.10E-07                         | 2.63E-07 | 8.37E-05  | 7.10E-05 |
| Próstata                            | 0                                | 2.45E-07 | 0.00E+00  | 6.62E-05 |
| Parede do intestino delgado         | 3.25E-07                         | 3.24E-07 | 8.78E-05  | 8.75E-05 |
| Baço                                | 3.70E-07                         | 3.34E-07 | 9.99E-05  | 9.02E-05 |
| Timo                                | 3.40E-07                         | 2.82E-07 | 9.18E-05  | 7.61E-05 |
| Útero                               | 2.76E-07                         | 0        | 7.45E-05  | 0.00E+00 |

**Tabela 12:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, na deslamagem  $^{232}\text{Th}$ .

| Deslamagem $^{232}\text{Th}$ |                                  |          |           |          |
|------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                       | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                              | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                 | 2.74E-07                         | 2.47E-07 | 3.51E-04  | 3.16E-04 |
| Cólon                        | 3.43E-07                         | 3.51E-07 | 4.39E-04  | 4.49E-04 |
| Pulmões                      | 3.56E-07                         | 3.10E-07 | 4.56E-04  | 3.97E-04 |
| Parede do estômago           | 3.56E-07                         | 3.09E-07 | 4.56E-04  | 3.96E-04 |
| Mama                         | 3.66E-07                         | 3.81E-07 | 4.68E-04  | 4.88E-04 |
| Ovários                      | 2.91E-07                         | 0        | 3.72E-04  | 0.00E+00 |
| Testículos                   | 0                                | 4.54E-07 | 0.00E+00  | 5.81E-04 |
| Parede da bexiga urinária    | 3.46E-07                         | 2.82E-07 | 4.43E-04  | 3.61E-04 |
| Esôfago                      | 2.93E-07                         | 2.47E-07 | 3.75E-04  | 3.16E-04 |
| Fígado                       | 3.52E-07                         | 3.10E-07 | 4.51E-04  | 3.97E-04 |
| Tireoide                     | 4.26E-07                         | 4.05E-07 | 5.45E-04  | 5.18E-04 |
| Superfície óssea             | 4.70E-07                         | 4.60E-07 | 6.02E-04  | 5.89E-04 |
| Cérebro                      | 3.44E-07                         | 3.11E-07 | 4.40E-04  | 3.98E-04 |
| Glândulas Salivares          | 3.83E-07                         | 4.11E-07 | 4.90E-04  | 5.26E-04 |
| Pele                         | 5.97E-07                         | 5.89E-07 | 7.64E-04  | 7.54E-04 |
| Adrenais                     | 2.68E-07                         | 2.82E-07 | 3.43E-04  | 3.61E-04 |
| Região extra-torácica        | 3.54E-07                         | 3.57E-07 | 4.53E-04  | 4.57E-04 |
| Parede abdominal             | 2.67E-07                         | 2.77E-07 | 3.42E-04  | 3.55E-04 |
| Parede do coração            | 3.37E-07                         | 2.91E-07 | 4.31E-04  | 3.72E-04 |
| Rins                         | 3.39E-07                         | 3.22E-07 | 4.34E-04  | 4.12E-04 |
| Linfá                        | 3.66E-07                         | 3.44E-07 | 4.68E-04  | 4.40E-04 |
| Músculo                      | 4.14E-07                         | 4.11E-07 | 5.30E-04  | 5.26E-04 |
| Mucosa oral                  | 3.37E-07                         | 3.02E-07 | 4.31E-04  | 3.87E-04 |
| Pâncreas                     | 3.10E-07                         | 2.63E-07 | 3.97E-04  | 3.37E-04 |
| Próstata                     | 0                                | 2.45E-07 | 0.00E+00  | 3.14E-04 |
| Parede do intestino delgado  | 3.25E-07                         | 3.24E-07 | 4.16E-04  | 4.15E-04 |
| Baço                         | 3.70E-07                         | 3.34E-07 | 4.74E-04  | 4.28E-04 |
| Timo                         | 3.40E-07                         | 2.82E-07 | 4.35E-04  | 3.61E-04 |
| Útero                        | 2.76E-07                         | 0        | 3.53E-04  | 0.00E+00 |

**Tabela 13:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no rejeito de flotação  $^{232}\text{Th}$ .

| Rejeito de Flotação $^{232}\text{Th}$ |                                  |          |           |          |
|---------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                                | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                       | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                          | 2.74E-07                         | 2.47E-07 | 2.79E-04  | 2.52E-04 |
| Cólon                                 | 3.43E-07                         | 3.51E-07 | 3.50E-04  | 3.58E-04 |
| Pulmões                               | 3.56E-07                         | 3.10E-07 | 3.63E-04  | 3.16E-04 |
| Parede do estômago                    | 3.56E-07                         | 3.09E-07 | 3.63E-04  | 3.15E-04 |
| Mama                                  | 3.66E-07                         | 3.81E-07 | 3.73E-04  | 3.89E-04 |
| Ovários                               | 2.91E-07                         | 0        | 2.97E-04  | 0.00E+00 |
| Testículos                            | 0                                | 4.54E-07 | 0.00E+00  | 4.63E-04 |
| Parede da bexiga urinária             | 3.46E-07                         | 2.82E-07 | 3.53E-04  | 2.88E-04 |
| Esôfago                               | 2.93E-07                         | 2.47E-07 | 2.99E-04  | 2.52E-04 |
| Fígado                                | 3.52E-07                         | 3.10E-07 | 3.59E-04  | 3.16E-04 |
| Tireoide                              | 4.26E-07                         | 4.05E-07 | 4.35E-04  | 4.13E-04 |
| Superfície óssea                      | 4.70E-07                         | 4.60E-07 | 4.79E-04  | 4.69E-04 |
| Cérebro                               | 3.44E-07                         | 3.11E-07 | 3.51E-04  | 3.17E-04 |
| Glândulas Salivares                   | 3.83E-07                         | 4.11E-07 | 3.91E-04  | 4.19E-04 |
| Pele                                  | 5.97E-07                         | 5.89E-07 | 6.09E-04  | 6.01E-04 |
| Adrenais                              | 2.68E-07                         | 2.82E-07 | 2.73E-04  | 2.88E-04 |
| Região extra-torácica                 | 3.54E-07                         | 3.57E-07 | 3.61E-04  | 3.64E-04 |
| Parede abdominal                      | 2.67E-07                         | 2.77E-07 | 2.72E-04  | 2.83E-04 |
| Parede do coração                     | 3.37E-07                         | 2.91E-07 | 3.44E-04  | 2.97E-04 |
| Rins                                  | 3.39E-07                         | 3.22E-07 | 3.46E-04  | 3.28E-04 |
| Língua                                | 3.66E-07                         | 3.44E-07 | 3.73E-04  | 3.51E-04 |
| Músculo                               | 4.14E-07                         | 4.11E-07 | 4.22E-04  | 4.19E-04 |
| Mucosa oral                           | 3.37E-07                         | 3.02E-07 | 3.44E-04  | 3.08E-04 |
| Pâncreas                              | 3.10E-07                         | 2.63E-07 | 3.16E-04  | 2.68E-04 |
| Próstata                              | 0                                | 2.45E-07 | 0.00E+00  | 2.50E-04 |
| Parede do intestino delgado           | 3.25E-07                         | 3.24E-07 | 3.32E-04  | 3.30E-04 |
| Baço                                  | 3.70E-07                         | 3.34E-07 | 3.77E-04  | 3.41E-04 |
| Timo                                  | 3.40E-07                         | 2.82E-07 | 3.47E-04  | 2.88E-04 |
| Útero                                 | 2.76E-07                         | 0        | 2.82E-04  | 0.00E+00 |

**Tabela 14:** Taxas de dose de radiação (nSv/h) em diferentes órgãos, tanto para mulher quanto para homem, no concentrado de apatita  $^{232}\text{Th}$ .

| Concentrado de Apatita $^{232}\text{Th}$ |                                  |          |           |          |
|------------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
| Orgãos                                   | H (nSv x m <sup>2</sup> /h x Bq) |          | H (nSv/h) |          |
|                                          | Mulher                           | Homem    | Mulher    | Homem    |
| Medula óssea                             | 2.74E-07                         | 2.47E-07 | 1.25E-04  | 1.12E-04 |
| Cólon                                    | 3.43E-07                         | 3.51E-07 | 1.56E-04  | 1.60E-04 |
| Pulmões                                  | 3.56E-07                         | 3.10E-07 | 1.62E-04  | 1.41E-04 |
| Parede do estômago                       | 3.56E-07                         | 3.09E-07 | 1.62E-04  | 1.41E-04 |
| Mama                                     | 3.66E-07                         | 3.81E-07 | 1.67E-04  | 1.73E-04 |
| Ovários                                  | 2.91E-07                         | 0        | 1.32E-04  | 0.00E+00 |
| Testículos                               | 0                                | 4.54E-07 | 0.00E+00  | 2.07E-04 |
| Parede da bexiga urinária                | 3.46E-07                         | 2.82E-07 | 1.57E-04  | 1.28E-04 |
| Esôfago                                  | 2.93E-07                         | 2.47E-07 | 1.33E-04  | 1.12E-04 |
| Fígado                                   | 3.52E-07                         | 3.10E-07 | 1.60E-04  | 1.41E-04 |
| Tireoide                                 | 4.26E-07                         | 4.05E-07 | 1.94E-04  | 1.84E-04 |
| Superfície óssea                         | 4.70E-07                         | 4.60E-07 | 2.14E-04  | 2.09E-04 |
| Cérebro                                  | 3.44E-07                         | 3.11E-07 | 1.57E-04  | 1.42E-04 |
| Glândulas Salivares                      | 3.83E-07                         | 4.11E-07 | 1.74E-04  | 1.87E-04 |
| Pele                                     | 5.97E-07                         | 5.89E-07 | 2.72E-04  | 2.68E-04 |
| Adrenais                                 | 2.68E-07                         | 2.82E-07 | 1.22E-04  | 1.28E-04 |
| Região extra-torácica                    | 3.54E-07                         | 3.57E-07 | 1.61E-04  | 1.62E-04 |
| Parede abdominal                         | 2.67E-07                         | 2.77E-07 | 1.21E-04  | 1.26E-04 |
| Parede do coração                        | 3.37E-07                         | 2.91E-07 | 1.53E-04  | 1.32E-04 |
| Rins                                     | 3.39E-07                         | 3.22E-07 | 1.54E-04  | 1.47E-04 |
| Linfa                                    | 3.66E-07                         | 3.44E-07 | 1.67E-04  | 1.57E-04 |
| Músculo                                  | 4.14E-07                         | 4.11E-07 | 1.88E-04  | 1.87E-04 |
| Mucosa oral                              | 3.37E-07                         | 3.02E-07 | 1.53E-04  | 1.37E-04 |
| Pâncreas                                 | 3.10E-07                         | 2.63E-07 | 1.41E-04  | 1.20E-04 |
| Próstata                                 | 0                                | 2.45E-07 | 0.00E+00  | 1.11E-04 |
| Parede do intestino delgado              | 3.25E-07                         | 3.24E-07 | 1.48E-04  | 1.47E-04 |
| Baço                                     | 3.70E-07                         | 3.34E-07 | 1.68E-04  | 1.52E-04 |
| Timo                                     | 3.40E-07                         | 2.82E-07 | 1.55E-04  | 1.28E-04 |
| Útero                                    | 2.76E-07                         | 0        | 1.26E-04  | 0.00E+00 |