



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Flávia Luiza Soares Borges

**Avaliação da concentração de atividade total e da dose como base para
requisitos regulatórios de proteção radiológica em instalações minero-
industriais**

Rio de Janeiro

2024

Flávia Luiza Soares Borges

**Avaliação da concentração de atividade total e da dose como base para requisitos
regulatórios de proteção radiológica em instalações mínero-industriais**

Tese apresentada, como requisito parcial para
obtenção do título de Doutora, ao Programa de
Pós-graduação em Meio Ambiente, da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

B732 Borges, Flávia Luiza Soares.
Avaliação da concentração de atividade total e da dose como base
para requisitos regulatórios de proteção radiológica em instalações
mínero-industriais/Flávia Luiza Soares Borges. – 2024.
106 f. : il.

Orientador: Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos.
Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Universidade do Estado do
Rio de Janeiro.

1. Radiação - Medidas de proteção - Teses. 2. Substâncias
radioativas - Teses. 3. Indústrias - Aspectos ambientais - Teses. I.
Mattos, Ubirajara Aluizio de Oliveira. II. Universidade do Estado do
Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 504.06

Patricia Bello Meijinhos CRB7/5217 - Bibliotecária responsável pela elaboração da ficha catalográfica

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,
desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Flávia Luiza Soares Borges

**Avaliação da concentração de atividade total e da dose como base para requisitos
regulatórios de proteção radiológica em instalações minero-industriais**

Tese apresentada, como requisito parcial para
obtenção do título de Doutora, ao Programa de
Pós-graduação em Meio Ambiente, da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 02 de maio de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Dra. Barbara Paci Mazzilli
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN

Dra. Karoline Pinheiro Frankenfeld
General Eletric do Brasil

Dra. Neyliane Frassinetti Gonçalves dos Santos
Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

Dra. Paula Raquel dos Santos
Faculdade de Enfermagem - UERJ

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

À minha amorinha, Maria Luiza.

AGRADECIMENTOS

Ao longo do desenvolvimento desta tese tive a sorte de contar com o apoio e a contribuição de muitas pessoas e instituições. Gostaria de registrar meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e, em especial:

- à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), particularmente à Divisão de Matérias-Primas e Minerais (DIMAP), por ter permitido o desenvolvimento desta tese, tanto em termos de autorização para a capacitação quanto para o uso dos dados essenciais para a minha pesquisa – sem o apoio institucional da CNEN, este trabalho não teria sido possível;
- ao professor Ubirajara, pela confiança, generosidade e orientação, fundamentais para que eu pudesse atingir os objetivos propostos;
- aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente (PPGMA), pelos ensinamentos, debates enriquecedores e disponibilidade;
- aos colegas da CNEN pelo apoio e incentivo constantes – a colaboração e o apoio técnico de vocês foram essenciais para o progresso desta pesquisa;
- aos companheiros de doutorado, com quem tive a oportunidade de aprender e me surpreender durante esses anos;
- ao meu marido, Hugo, pelo companheirismo, ajuda e incentivo, que foram fundamentais para que eu me dedicasse a este trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos e familiares, que tanto me encorajaram nesta importante trajetória.

A todos vocês, meu muito obrigada. Este trabalho é um resultado coletivo, e sou imensamente grata por cada contribuição e por todo o apoio recebido.

RESUMO

BORGES, Flávia Luiza Soares. *Avaliação da concentração de atividade total e da dose como base para requisitos regulatórios de proteção radiológica em instalações minero-industriais*. 2024. 106 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Considerando o pressuposto de existência de risco associado a baixas doses de radiação ionizante, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) publicou pela primeira vez em 2014, norma para estabelecer requisitos de proteção radiológica para instalações de mineração e beneficiamento de minérios convencionais que ocorrem associados a radionuclídeos naturais. De acordo com a Norma CNEN-NN-4.01, essas instalações são classificadas em 3 categorias distintas, relacionadas à maior concentração de atividade total dos radionuclídeos das séries do urânio e do tório nas etapas do processo de produção da instalação. No entanto, questiona-se se a concentração de atividade, por si só, é parâmetro suficiente para a definição dos requisitos de segurança e proteção radiológica. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo traçar o perfil das instalações minero-industriais do Brasil e avaliar a concentração de atividade total e a dose ambiental como parâmetros para estimativa do risco radiológico potencial dessas instalações. Foi adotada uma abordagem metodológica mista, compreendendo análises quantitativas e qualitativas, com a finalidade de descrever detalhadamente as características das instalações e explorar suas relações com os requisitos de proteção radiológica estabelecidos normativamente. Foi realizada a caracterização das instalações minero-industriais, embasada na coleta de dados dos processos de autorização dessas instalações junto à CNEN. Para estimar as doses decorrentes das instalações minero-industriais em indivíduos do público, foi utilizado o software RESRAD-OFFSITE, e foi conduzida uma análise de correlação entre a dose e a concentração de atividade total. Os resultados indicaram que das 35 instalações minero-industriais, dez apresentaram concentração de atividade total acima de 500 Bq/g; nove, entre 100 e 500 Bq/g; e dezesseis, concentração total inferior a 100 Bq/g e superior ao limite de isenção, de 10Bq/g. Quanto à dose ocupacional, os resultados, de modo geral, indicaram baixo risco nas instalações analisadas. Para a estimativa de dose no indivíduo do público, as informações para a avaliação do impacto radiológico ambiental constantes nos processos foram insuficientes para a modelagem de instalações específicas, sendo feita simulação genérica que indicou, como já apresentado na literatura, dependência da dose em função da concentração de atividade e do volume de material. Os testes de correlação entre a dose ocupacional e a concentração de atividade total revelaram uma associação estatisticamente significativa entre eles. Contudo, ao segmentar a análise por categoria notou-se que apenas a categoria I (concentrações de atividade total acima de 500 Bq/g) demonstra uma correlação estatisticamente significativa e de magnitude moderada; para as outras categorias, com concentrações inferiores a 500Bq/g, não foi constatada uma correlação estatisticamente relevante. A adoção de uma abordagem gradual baseada tanto na concentração de atividade total quanto na dose estimada para indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público pode ser uma alternativa mais adequada para a regulamentação das instalações minero-industriais. Tal estratégia possibilitaria regulação e fiscalização mais eficazes, priorizando as situações que mais necessitam de intervenção.

Palavras-chave: radionuclídeos naturais; regulação; concentração total de atividade; dose; radiação.

ABSTRACT

BORGES, Flávia Luiza Soares. *Assessment of total activity concentration and dose as a basis for regulatory requirements for radiation protection in mining and milling facilities*. 2024. 106 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Considering the assumption of risk associated with low doses of ionizing radiation, the National Nuclear Energy Commission (CNEN) published for the first time in 2014 a standard to establish radiological protection requirements for mining and processing facilities for conventional minerals that occur associated with natural radionuclides. According to Standard CNEN-NN-4.01, these facilities are classified into three distinct categories related to the highest concentration of total activity of radionuclides of the uranium and thorium series in the stages of the facility's production process. However, it is questionable whether the activity concentration is a sufficient parameter for defining radiological safety and protection requirements. In this context, the present study aimed to outline the profile of mining-industrial facilities in Brazil and evaluate the total activity concentration and environmental dose as parameters for estimating the potential radiological risk of these facilities. A mixed methodological approach was adopted, comprising quantitative and qualitative analyses, to describe in detail the facilities' characteristics and explore their relationships with the radiological protection requirements established by regulations. The mining and milling facilities were characterized based on data collection from the authorization processes of these facilities with CNEN. RESRAD-OFFSITE software was used to estimate the doses resulting from mining-industrial facilities in individuals from the public, and a correlation analysis was conducted between the dose and the total activity concentration. The results indicated that ten of the 35 facilities had total activity concentrations above 500 Bq/g; nine, between 100 and 500 Bq/g; and sixteen had total activity concentrations below 100 Bq/g and above the exemption limit of 10 Bq/g. Regarding the occupational dose, the results generally indicated low risk in the facilities analyzed. To estimate the dose to the individual member of the public, the information for assessing the environmental radiological impact contained in the processes was insufficient for modeling specific facilities, and a generic simulation was performed indicating, as already presented in the literature, dependence of the dose on the activity concentration and the volume of material. The correlation tests between the occupational dose and the total activity concentration revealed a statistically significant association between them. However, when segmenting the analysis by category, it was noted that only category I (total activity concentrations above 500 Bq/g) demonstrates a statistically significant correlation of moderate magnitude; for the other categories, with concentrations below 500 Bq/g, no statistically relevant correlation was found. Adopting an approach based on total activity concentration and estimated dose to workers and the public may be a more appropriate alternative for regulating mining and milling facilities. Such a strategy would enable more effective regulation, prioritizing situations that most require intervention.

Keywords: natural radionuclides; regulation; total activity concentration; dose; radiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estruturação da pesquisa	19
Figura 2 – Grandezas de radioatividade, dosimétricas, operacionais e de proteção	26
Figura 3 – Relação entre dose e efeito.....	30
Figura 4 – Modelos para representação da relação dose-risco	31
Figura 5 – Variação na taxa de equivalente de dose em relação à altitude (representada na curva superior).....	39
Figura 6 – Cadeias de decaimento do U-238 e Th-232	40
Quadro 1 – Atividades industriais que podem intensificar a concentração de radionuclídeos naturais.....	41
Figura 7 – Abordagens regulatórias para instalações que lidam com materiais radioativos de ocorrência natural	47
Figura 8 – Fluxograma do processo de classificação e autorização de instalações minero-industriais.....	48
Figura 9 – Distribuição geográfica das instalações minero-industriais não isentas	53
Figura 10 – Instalações minero-industriais por tipo (mina; usina) e categoria	54
Figura 11 – Gráficos boxplot para concentração dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações minero-industriais de fosfato (n = 111)	57
Figura 12 – Gráfico boxplot para concentração de atividade dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações de estanho (n = 61)	62
Figura 13 – Gráficos boxplot para concentração de atividade dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210, por tipo de amostras, em instalações minero-industriais de nióbio (n = 61)	65
Figura 14 – Gráficos boxplot para concentração dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações de carvão (n = 9).....	69
Figura 15 – Gráficos boxplot para concentração de atividade dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações de titânio (n = 28) ...	72
Figura 16 – Gráficos boxplot para concentração dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações minero-industriais de terras raras (n = 7)	75

Figura 17 – Vias de exposição.....	80
Figura 18 – Gráfico de dose externa (mSv/ano) por via de exposição para instalação mínimo-industrial de categoria I.....	82
Figura 19 – Gráfico de dose externa (mSv/ano) por via de exposição para instalação mínimo-industrial de categoria II	83
Figura 20 – Gráfico de dose externa (mSv/ano) por via de exposição para instalação mínimo-industrial de categoria III	84
Figura 21 – Gráfico de análise de sensibilidade da área de deposição para as instalações mínimo-industriais de categoria I	86
Figura 22 – Gráfico de análise de sensibilidade da área de deposição para as instalações mínimo-industriais de categoria II.....	87
Figura 23 – Gráfico de análise de sensibilidade da área de deposição para as instalações mínimo-industriais de categoria III.....	88
Figura 24 – Gráfico de dispersão para associação entre a maior taxa de dose (mSv/ano) e a concentração de atividade total (n = 35).....	89
Figura 25 – Gráfico de dispersão para associação entre concentração de atividade total e dose, por categoria (n = 35)	90
Figura 26 – Gráfico de dispersão da maior taxa de dose (mSv/ano) de acordo com minério, para as Categorias I, II e III	91
Figura 27 – Gráfico das frequências (n) observadas e esperadas entre categoria da instalação e tipo de amostra da classificação.....	93
Figura 28 – Categoria da instalação por tipo de amostra da classificação	94
Figura 29 – Gráfico de dispersão da concentração de atividade, por tipo de amostra, para as categorias I, II e III	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de ponderação de órgãos ou tecidos W_T	27
Tabela 2 – Fator de peso da radiação W_R	28
Tabela 3 – Risco de incidência e mortalidade devido a tumores sólidos decorrentes da exposição à radiação, em número de casos ou mortes por 100.000 pessoas expostas	32
Tabela 4 – Comparação dos limites de dose recomendados pela ICRP	35
Tabela 5: Indicadores de acidentes de trabalho do ano de 2022	43
Tabela 6 – Classificação e concentração de atividade total de instalações mineiro-industriais não isentas aos requisitos da Norma CNEN-NN-4.01	53
Tabela 7 – Caracterização das instalações mineiro-industriais de mineração e beneficiamento de fosfato quanto à categoria e concentração de atividade total (maior valor e amostra relacionada)	55
Tabela 8 – Concentração de atividade de radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, de acordo com o tipo de amostra em instalações mineiro-industriais de fosfato (n = 113)	56
Tabela 9 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos/rejeitos de instalações mineiro-industriais de fosfato	58
Tabela 10 – Categoria e concentração de atividade total (valor e amostra relacionada) em instalações mineiro-industriais de estanho	60
Tabela 11 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos/rejeitos de instalações mineiro-industriais de estanho	61
Tabela 12 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para instalações mineiro-industriais do estanho (n = 61)	62
Tabela 13 – Categoria, concentração de atividade e amostra relacionada em instalações de mineração e beneficiamento de nióbio	64
Tabela 14 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para as instalações mineiro-industriais de nióbio (n = 64)	65
Tabela 15 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações mineiro-industriais de nióbio	66
Tabela 16 – Categoria, concentração de atividade e amostra relacionada em instalações de mineração de carvão	68
Tabela 17 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para o minério Carvão (n = 9)	69

Tabela 18 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações de mineração e beneficiamento de carvão	70
Tabela 19 – Categoria, concentração de atividade total e amostra relacionada em instalações minero-industriais de titânio	71
Tabela 20 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para as instalações minero-industriais de titânio (n = 28)	71
Tabela 21 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações de mineração e beneficiamento de titânio	73
Tabela 22 – Categoria, concentração de atividade e amostra relacionada em instalações minero-industriais de terras raras	74
Tabela 23 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para instalações minero-industriais de terras raras (n = 7)	74
Tabela 24 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações de mineração e beneficiamento de terras raras.....	76
Tabela 25 – Dose externa (mSv/ano) estimada para trabalhadores em instalações minero-industriais, por tipo de minério.....	78
Tabela 26 – Concentrações de atividade utilizadas para a modelagem, por categoria da instalação	81
Tabela 27 – Dose total por categoria de instalação (mSv/ano), por tempo em anos.....	81
Tabela 28 – Taxa de dose externa ocupacional anual (mSv/a) de acordo com o minério, para categoria III (n = 14).....	90
Tabela 29 – Taxa de dose externa ocupacional (mSv/a) de acordo com o minério, para categoria II (n = 4).....	91
Tabela 30 – Taxa de dose externa ocupacional anual (mSv/a) de acordo com o minério, para Categoria I (n = 11)	91
Tabela 31 – Teste exato de Fisher para associação entre categoria e tipo de amostra da classificação (n = 283).....	92
Tabela 32 – Teste exato de Fisher para a associação entre tipo de instalação e tipo de amostra da classificação (n = 283)	94
Tabela 33 – Teste de Kruskal-Wallis para Concentração de atividade (Bq/g) de acordo com Tipo de amostra, para Categoria III (n = 127).....	95
Tabela 34 – Teste de Kruskal-Wallis para Concentração de atividade (Bq/g) de acordo com Tipo de amostra, para Categoria II (n = 53)	95

Tabela 35 – Teste de Kruskal-Wallis para concentração de atividade (Bq/g) de acordo com Tipo de amostra, para Categoria I (n = 53)	96
---	----

SUMÁRIO

Introdução	15
1 OBJETIVOS.....	18
1.1 Objetivo geral	18
1.2 Objetivos específicos	18
2 METODOLOGIA.....	19
2.1 Caracterização das instalações minero-industriais	20
2.2 Estimativa do impacto radiológico ambiental	22
2.3 Análises estatísticas	23
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	25
3.1 Noções básicas de radiação	25
3.1.1 Grandezas relacionadas à radioatividade natural	25
3.1.2 Efeitos biológicos da radiação ionizante	28
3.1.3 Proteção radiológica	32
3.1.4 Princípios de proteção radiológica	34
3.1.5 Categorias de exposição	35
3.1.6 Situações de exposição	36
3.2 Radioatividade natural.....	38
3.2.1 Conceitos básicos e definição.....	38
3.2.2 Principais indústrias que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural.....	40
3.3 Riscos associados a instalações e atividades que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural e acidentes de trabalho	42
3.4 Proteção radiológica aplicável a indústrias que lidam com materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Caracterização das instalações minero-industriais	52
4.1.1 Fosfato	54
4.1.2 Estanho	59
4.1.3 Nióbio.....	63
4.1.4 Carvão	67
4.1.5 Titânio	70

4.1.6	Terras raras	73
4.2	Estimativa de dose ocupacional	76
4.3	Estimativa do impacto radiológico ambiental	79
4.2	Análise das variáveis relacionadas ao critério atual para estabelecimento de requisitos em radioproteção (concentração de atividade total)	89
4.2.1	Dose externa ocupacional e concentração de atividade	89
4.2.2	Categoria e tipo de amostra	92
4.2.3	Tipo de instalação e tipo de amostra	93
4.2.4	Concentração de atividade total e categoria x tipo de amostra	94
	Conclusões	96
	REFERÊNCIAS	100

INTRODUÇÃO

Há, no nosso ambiente, inúmeros radionuclídeos que contribuem para a exposição à radiação ionizante. De modo geral, esses radionuclídeos são classificados como: artificiais, quando resultantes da atividade humana; cósmicos, formados em decorrência da interação de raios cósmicos com núclídeos estáveis presentes na atmosfera; e primordiais, que têm sua origem no processo de formação da Terra (FELICIANO, 2016).

É um fato conhecido que a exposição a radionuclídeos de origem natural tende a ser reduzida, devido às concentrações de radionuclídeos naturais em amostras ambientais serem comumente baixas. Estima-se que a dose equivalente decorrente da radiação de fundo natural, para aproximadamente 99% da população, varia de 0,3 a 1,4 mSv/ano; entretanto, para indivíduos que vivem em áreas anômalas, essa dose pode chegar a 17 mSv/ano (FELICIANO, 2016).

Entretanto, a ação antrópica sobre os materiais que contêm radionuclídeos de ocorrência natural pode concentrar esses radionuclídeos e aumentar a exposição, a probabilidade de exposição ou o número de pessoas expostas à radiação, por inserir fontes ou modificar o conjunto de vias de exposição devido às fontes existentes (CNEN, 2005). Algumas instalações e atividades estão mais propensas a esse aumento da concentração de radionuclídeos em etapas de produção, a depender do tipo de minério, de matérias-primas ou dos processos de extração e beneficiamento mineral. Dentre as práticas que envolvem exposição a radionuclídeos naturais, podemos citar a mineração e o beneficiamento de urânio, a mineração e o beneficiamento de minérios convencionais que ocorrem associados a radionuclídeos naturais, a geração de rejeitos contendo radionuclídeos em plataformas de exploração de petróleo e gás e a exposição ao radônio (IAEA, 2006).

A regulamentação das instalações e atividades que envolvem exposição a radionuclídeos naturais é necessária devido ao modelo assumido pelo sistema de proteção radiológica, o qual considera que mesmo para baixas doses de radiação ionizante existe um risco associado. Vários países estabeleceram diretrizes ou requisitos regulatórios para tais atividades. No Canadá, por exemplo, as diretrizes para o gerenciamento de materiais radioativos de ocorrência natural assumem que as pessoas expostas devem estar sujeitas aos mesmos requisitos de exposição à radiação que se aplicam às pessoas expostas a materiais

radioativos regulamentados pela Comissão Canadense de Segurança Nuclear (CHAMBERS, 2015).

Na Austrália, o Código de Mineração estabelece critérios para exposição ocupacional e para o gerenciamento de resíduos radioativos, definindo um sistema de aprovações e autorizações para diversas etapas de operação (JEFFRIES *et al.*, 2011). Adicionalmente, o guia australiano de segurança (*Safety guide: monitoring, assessing and recording occupational radiation doses in mining and mineral processing*) descreve um processo baseado no risco para identificar as situações em que o controle regulatório é apropriado para operações que envolvem materiais radioativos de ocorrência natural e fornece uma abordagem gradativa, pela qual as medidas de controle são avaliadas de acordo com risco, considerando as doses potenciais para os trabalhadores e para os membros do público (ARPANSA, 2011).

No Brasil, a estrutura regulatória em radioproteção aplicável às práticas envolvendo radiação natural é desenvolvida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e distingue três tipos de instalações: nucleares, depósitos de rejeitos radiativos e minero-industriais. As instalações nucleares são as que realizam mineração e beneficiamento de urânio, enquanto as instalações minero-industriais são aquelas onde são lavrados e/ou processados minérios e minerais convencionais que ocorrem associados a radionuclídeos das séries naturais do urânio e/ou do tório (incluindo depósito inicial de rejeitos e locais de armazenamento de escórias e resíduos), sem ter, contudo, objetivo de separação ou extração desses elementos radioativos (CNEN, 2014). Os depósitos finais de rejeito radiativo não são abrangidos pela regulamentação de instalações minero-industriais e devem seguir norma específica.

O controle regulatório das instalações minero-industriais, para fins de proteção radiológica, começou a ser realizado em 2005, com a publicação da primeira versão da Norma CNEN-NN-4.01 – Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações minero-industriais (CNEN, 2005). Essa norma apresentava critérios para classificação das instalações, especificava os requisitos para execução segura das atividades e previa avaliações ambientais e ocupacionais.

Contudo, a norma não estabeleceu nenhum ato administrativo de autorização dessas instalações e não especificou sanções para os casos de não conformidade. Em dezembro de 2016, foi publicada a revisão da Norma CNEN-NN-4.01, que alterou em parte os critérios de classificação e estabeleceu o ato administrativo de autorização para as instalações minero-industriais, este último até então ausente da estrutura regulatória (CNEN, 2016).

A Norma CNEN-NN-4.01 vigente classifica as instalações em três categorias, baseando-se na maior concentração de atividade total dos radionuclídeos das séries do urânio e do tório nas etapas do processo de produção da instalação. São classificadas na categoria I as instalações que apresentam tal concentração de atividade total superior a 500 Bq/g; na categoria II, as que têm concentração de atividade total entre 500 Bq/g e 100 Bq/g; e na categoria III aquelas instalações cuja concentração de atividade total é inferior a 100 Bq/g e superior a 10 Bq/g. As instalações com concentração de atividade total inferior a 10 Bq/g e dose efetiva anual de até 1 mSv para trabalhadores – ou, alternativamente, com dose efetiva anual ocupacional que não ultrapasse 1 mSv e dose anual a que esteja submetido o grupo crítico ou o indivíduo representativo que não ultrapasse 0,3 mSv – são isentas do cumprimento dos requisitos da norma.

Os requisitos de proteção e as etapas do processo de autorização a serem seguidas por cada instalação, excetuando os casos de isenção, se baseiam exclusivamente na maior concentração de atividade total encontrada nas amostras do processo produtivo, assumindo uma forte correlação entre a concentração de atividade e o impacto radiológico ocupacional e ambiental. No entanto, surge o questionamento sobre considerar a concentração de atividade total, por si só, como parâmetro suficiente para a definição desses requisitos.

O presente estudo tem como objetivo analisar os critérios de dose e de concentração de atividade nas instalações minero-industriais reguladas pela CNEN, buscando caracterizar as instalações e avaliar a adequação da utilização do critério de concentração de atividade para o estabelecimento de requisitos de proteção radiológica.

Este estudo é importante em termos sociais e regulatórios, ao visar que as operações de instalações minero-industriais, setor de grande impacto econômico para o Brasil, sejam executadas de forma segura e em consonância com requisitos de proteção radiológica, de forma a minimizar os impactos decorrentes do processamento de materiais contendo radionuclídeos para os trabalhadores, meio ambiente e indivíduos do público.

O escopo deste trabalho se limita às instalações minero-industriais abrangidas pela Norma CNEN-NN-4.01.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Caracterizar as instalações mínero-industriais no Brasil e avaliar os critérios de dose e de concentração de atividade total para definição de requisitos de proteção radiológica em instalações mínero-industriais que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as instalações mínero-industriais no Brasil, com base nas informações dos respectivos processos de Autorização para Posse, Uso e Armazenamento de Minérios, Matérias-Primas e Demais Materiais Contendo Radionuclídeos das Séries Naturais do Urânio e/ou Tório em instalações mínero-industriais.
- Avaliar impacto radiológico ambiental a partir da estimativa de dose para indivíduos do público.
- Avaliar a correlação da dose e da concentração de atividade total em instalações mínero-industriais reguladas pela CNEN conforme Norma CNEN-NN-4.01.

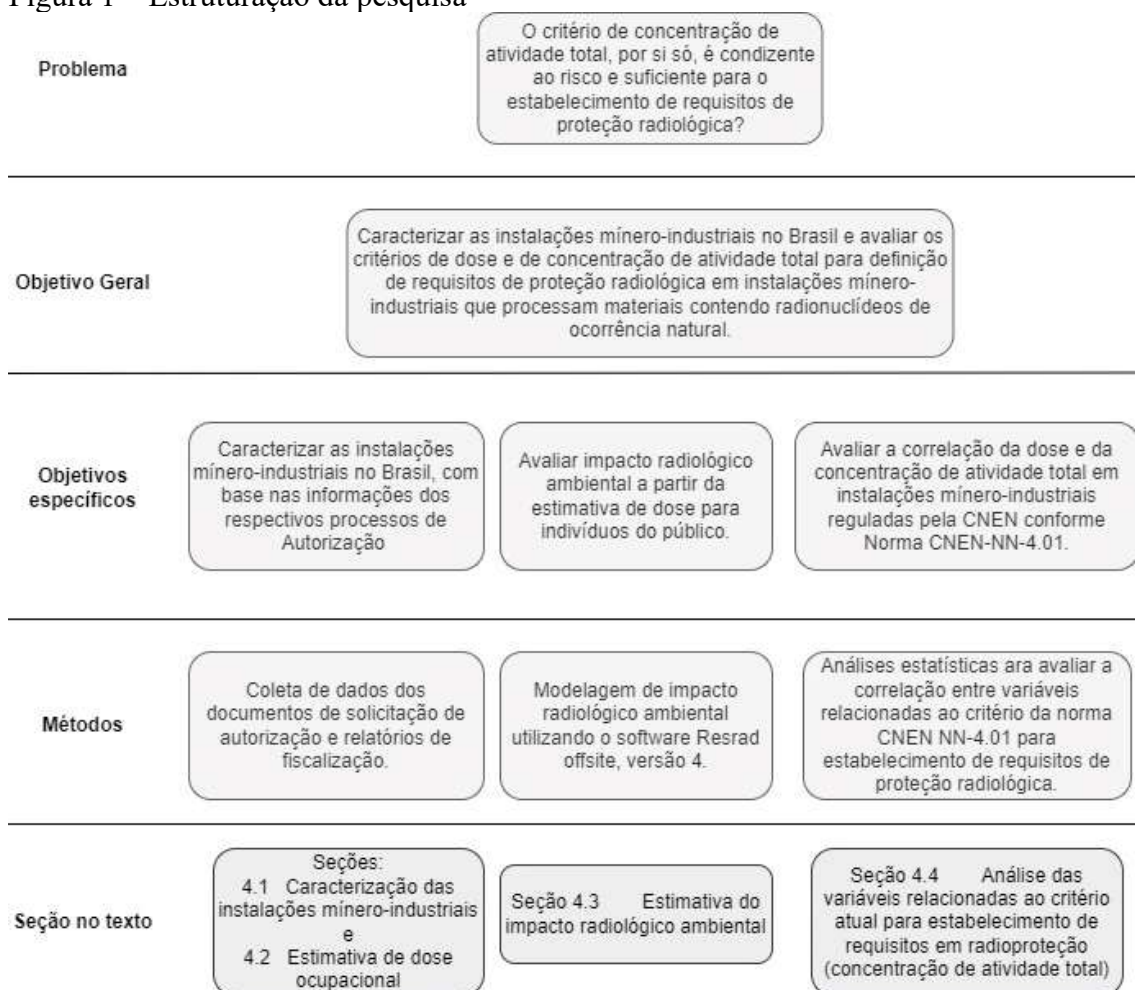
2 METODOLOGIA

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar os critérios de dose e de concentração de atividade total para definição de requisitos de proteção radiológica em instalações minero-industriais que processam minérios, matérias-primas ou materiais que contêm radionuclídeos de origem natural no Brasil.

Para atender esse objetivo, foi adotada uma abordagem mista, com a combinação de técnicas quantitativas e qualitativas, visando descrever as características das instalações e, a partir delas, explorar a relação entre essas características e os requisitos de proteção radiológica estabelecidos em norma.

A Figura 1 apresenta a estruturação da pesquisa, com breve descrição dos métodos e indicação da seção no texto para cada um dos objetivos definidos.

Figura 1 – Estruturação da pesquisa



Fonte: A autora, 2024.

2.1 Caracterização das instalações minero-industriais

A caracterização das instalações minero-industriais foi realizada empregando o método de pesquisa documental, utilizando materiais que ainda não receberam tratamento analítico, ou seja, fontes primárias (SÁ-SILVA; ALMEIDA; GUINDANI, 2009).

Foi realizada uma coleta de dados em documentos dos processos de solicitação da Autorização para Posse, Uso e Armazenamento de Minérios, Matérias-Primas e Demais Materiais Contendo Radionuclídeos das Séries Naturais do Urânio e/ou Tório em instalações minero-industriais. Neste trabalho, o supracitado ato administrativo será referenciado também como “Autorização para Posse, Uso e Armazenamento”, ou, ainda, apenas como “Autorização”.

A documentação é controlada pela Divisão de Controle de Matérias-Primas e Minerais (DIMAP) da CNEN em atendimento à Norma CNEN-NN-4.01. Os documentos analisados para este trabalho foram as informações preliminares, os relatórios de classificação e os relatórios de fiscalização, disponíveis até dezembro de 2022. Não foram utilizados dados pessoais de trabalhadores nem dados confidenciais das instalações.

É importante ressaltar que algumas instalações minero-industriais são também classificadas como instalações radiativas, conforme Norma CNEN-NN-6.02, devido ao uso de fontes seladas (CNEN, 2022). Contudo, os aspectos de proteção radiológica relacionados à utilização de tais fontes seladas nas instalações minero-industriais não foram tratados nesta pesquisa. Além disso, também não fizeram parte do escopo os aspectos de proteção radiológica relativos à deposição final de rejeitos provenientes de instalações minero-industriais.

Dos relatórios de classificação e de fiscalização, foram extraídos os seguintes dados referentes às instalações minero-industriais:

- a) localização da instalação (estado);
- b) minério;
- c) tipo de instalação;
- d) concentração de atividade total;
- e) amostra de processo com maior concentração de atividade total;
- f) categoria conforme Norma CNEN-NN-4.01;
- g) concentração dos radionuclídeos U-238, Ra-226 e Pb-210, da série de decaimento do urânio, e Th-232 e Ra-228, da série de decaimento do tório, nas amostras de processo;

- h) dados de levantamentos radiométricos – dose externa máxima estimada, dose externa média estimada e a área em que a maior taxa de dose foi registrada.

Foram coletadas informações detalhadas apenas das instalações não isentas, visto que, para instalações isentas não é necessária a adoção de medidas de proteção radiológica. Não foi possível identificar em todos os processos o quantitativo de resíduos e rejeitos gerados. Por essa razão, embora esse seja um fator importante para a análise de impacto radiológico ambiental, essa informação não consta no presente trabalho.

As instalações foram divididas em duas classes principais: minas e usinas. As minas incluem todas as estruturas necessárias para a mineração e o tratamento de minérios, incluindo, em alguns casos, operações de beneficiamento físico de minério; as usinas incluíram as instalações de extração, predominantemente, com processos pirometalúrgicos ou de extração por via úmida. A própria Norma CNEN-NN-4.01 se refere a essas unidades ao estabelecer que a instalação mineiro-industrial cuja mina esteja situada em local distinto da usina pode admitir classificação em duas categorias (CNEN, 2016).

As amostras de processo foram classificadas em quatro classes: minério, matéria-prima, produto e resíduos/rejeitos. Essa classificação foi útil para identificação da amostra de processo com maior concentração de atividade total, assim como para a melhor compreensão da migração dos radionuclídeos nas etapas dos processos industriais e para a avaliação do impacto radiológico de resíduos e rejeitos.

Na classe “minério” estão incluídos minérios *run of mine* (ROM) e concentrados minerais, sendo identificados durante a pesquisa: fosfato, estanho, nióbio, terras raras, titânio e carvão. A classe “matérias-primas” possui 17 amostras e inclui materiais diversos, desde amostras em que não são esperadas concentrações significativas de radionuclídeos até amostras que, embora sejam resíduos de uma instalação, entram como matéria-prima em outra instalação.

Os rejeitos radioativos são definidos como qualquer material, resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção e cuja reutilização é imprópria ou não prevista. Os resíduos, entretanto, são as substâncias, remanescentes de processamento físico ou químico, que contêm elementos radioativos em concentrações de atividade acima dos limites de isenção e que podem ser reutilizadas, levando em consideração aspectos econômicos, tecnológicos e de proteção radiológica (CNEN, 2016). Assim, devido à complexidade de classificação e à semelhança em termos de etapa de processo, optou-se por incluir resíduos e rejeitos no mesmo grupo de tipo de amostra.

A amostra de processo pela qual a instalação foi classificada nas categorias da Norma CNEN-NN-4.01 também foi classificada como as demais amostras, contudo, no grupo de “tipo de amostra que classifica” consta a categoria “matérias-primas, resíduos e produtos”. Isso se deve a uma instalação apenas em que não houve variação de concentração de atividade total entre as amostras de matéria-prima, resíduos e produtos, sendo a maior concentração de atividade igual em todas essas amostras.

Nos dados referentes à categoria, foi adotado o estabelecido na própria Norma CNEN-NN-4.01, que classifica as instalações minero-industriais em três categorias distintas a partir da concentração de atividade total: Categoria I, Categoria II e Categoria III.

Para estimar dose ocupacional, foi considerada apenas a dose decorrente da exposição externa; não foram incluídas análises de dados de doses internas nem doses decorrentes de exposição ao radônio (Rn-222) e ao torônio (Rn-220). Nos casos em que os levantamentos radiométricos constantes nos relatórios não apresentaram dose anual, a estimativa de dose ocupacional foi feita considerando uma jornada de trabalho de 2 mil horas anuais.

2.2 Estimativa do impacto radiológico ambiental

Para a avaliação de impacto radiológico ambiental, é necessário estimar as doses decorrentes de instalações minero-industriais para os indivíduos do público (TILL; GROGAN, 2008). Como os dados dos processos em si não contemplam essa informação, a estimativa de dose nos indivíduos do público foi realizada por meio de modelagem, utilizando a versão 4 do código RESRAD-OFFSITE.

O RESRAD-OFFSITE é um software desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para a avaliação de risco radiológico ambiental, destinado à análise de locais contaminados por radionuclídeos fora de áreas de contaminação primária. Além do cálculo de dose devido a um determinado termo fonte, o RESRAD-OFFSITE utiliza modelos de distribuição ambiental e migração de materiais radioativos ao longo do tempo, considerando fatores como a percolação de água através de solo contaminado, a transferência de radionuclídeos do solo e da água para alimentos e a exalação de radônio do solo (ANL, 2020).

O processo de análise de impacto radiológico ambiental inclui etapas relacionadas à caracterização do termo fonte, do transporte e dos cenários de exposição, e aos fatores de conversão de dose. No RESRAD-OFFSITE, são consideradas nove vias de exposição: exposição direta por contaminação no solo, inalação de partículas, inalação de radônio, ingestão de alimentos vegetais, carne, leite, alimentos aquáticos, água e solo (ANL, 2020).

2.3 Análises estatísticas

Para avaliar a correlação entre variáveis relacionadas ao critério da norma CNEN NN-4.01 para estabelecimento de requisitos de proteção radiológica, foram realizadas as seguintes análises estatísticas:

- concentração de atividade total e dose;
- doses entre os diferentes tipos de minérios, para cada categoria (I, II e III);
- concentrações de atividade total entre os diferentes tipos de amostra de processo, para cada categoria (I, II e III)
- atividade dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 entre os diferentes tipos de amostra de processo, para cada tipo de minério;
- categoria e tipo de amostra que classifica;
- tipo de instalação e tipo de amostra que classifica.

Para avaliar a relação entre concentração de atividade total e dose ocupacional, dada a não normalidade dos dados, foi utilizada a correlação não paramétrica de Spearman.

Para comparar as doses entre os diferentes tipos de minérios, para cada categoria (I, II e III), em razão da não normalidade dos dados, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Testes Kruskal-Wallis estatisticamente significativos foram seguidos pelo teste post-hoc Dunn-Bonferroni.

Testes Kruskal-Wallis seguidos do post-hoc Dunn-Bonferroni foram também utilizados para: 1) comparar as concentrações de atividade total entre os diferentes tipos de amostra de processo, para cada categoria e 2) comparar a atividade dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 entre os diferentes tipos de amostra de processo, para cada tipo de minério. Para o minério terras raras, como foram observados apenas dois tipos de amostra, foi utilizado o teste de Mann-Whitney.

Para avaliar a associação entre categoria e tipo de amostra que classifica e entre tipo de instalação e tipo de amostra que classifica, avaliou-se inicialmente se os dados atendiam ao pressuposto do teste qui-quadrado: frequências esperadas superiores a 5 em pelo menos 80% das células e 100% das células com frequências esperadas superiores a 1 (MCHUGH, 2013). Como esse pressuposto não foi atendido, utilizou-se o teste exato de Fisher, e os dados estatisticamente significativos foram seguidos pela análise dos resíduos padronizados ajustados (resíduos de Pearson), para identificar em quais categorias as frequências

observadas diferiam das esperadas. Resíduos fora do intervalo $[-1,96; 1,96]$ foram considerados estatisticamente significativos (SHARPE, 2015).

Todas as análises foram conduzidas no software R versão 4.3.0 (R CORE TEAM, 2023) e consideraram um nível de significância (α) de 5%.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo se destina à apresentação do escopo teórico sobre o tema desta pesquisa e está dividido em quatro seções, as quais abordarão: noções básicas de radiação; radioatividade natural; riscos associados a instalações e atividades que envolvem radionuclídeos de ocorrência natural; e proteção radiológica aplicável a indústrias que lidam com materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural.

3.1 Noções básicas de radiação

A fim de se estabelecer requisitos regulatórios de proteção radiológica em instalações minero-industriais que processam materiais contendo radionuclídeos naturais a partir da avaliação da concentração de atividade total e da dose é necessário compreender minimamente os conceitos básicos relacionados à radiação.

Para tanto, neste tópico serão apresentadas as grandezas relacionadas à radioatividade natural, os efeitos biológicos da radiação ionizante e aspectos inerentes à proteção radiológica, incluindo princípios de proteção, categorias e situações de exposição.

3.1.1 Grandezas relacionadas à radioatividade natural

Para a proteção radiológica é necessário saber o que se mede e a grandeza a ser utilizada.

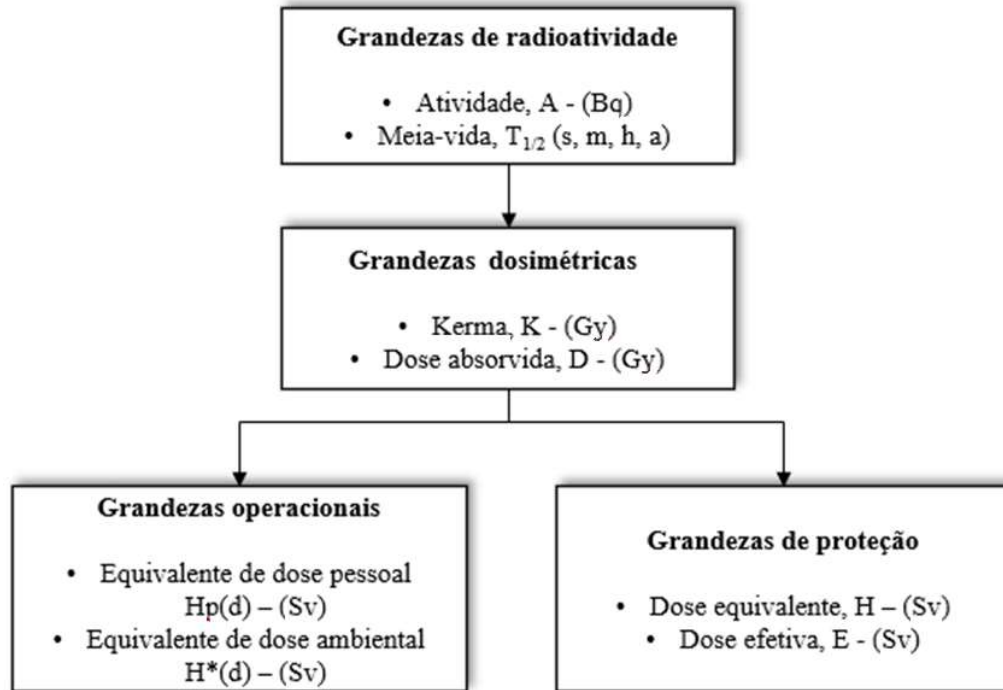
São três os tipos de grandezas de notória importância para proteção radiológica: grandezas físicas, grandezas operacionais e grandezas de proteção (IRD, 2002). A Figura 2 apresenta esquema com as grandezas e suas respectivas siglas e unidades.

A atividade é uma grandeza de radioatividade definida como o quociente dN/dt de uma quantidade de núcleos radioativos em um estado de energia particular, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas desse estado de energia no intervalo de tempo dt . A atividade é expressa em becquerel (Bq), que corresponde a uma desintegração nuclear por segundo (CNEN, 2021).

A concentração de um elemento expressa a razão desse elemento em uma determinada massa. Normalmente, para minérios e elementos minerais, a concentração é apresentada em partes por milhão (ppm) ou porcentagem. Analogamente, a concentração de atividade de

radionuclídeos expressa a razão da atividade de um radionuclídeo em uma massa (CNEN, 2021).

Figura 2 – Grandezas de radioatividade, dosimétricas, operacionais e de proteção



Fonte: Elaborado com base no livro Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (IRD, 2002).

A correlação entre a concentração de urânio e a concentração de atividade desse elemento em uma amostra pode ser feita por meio da equação (1), útil para cálculo da concentração de atividade de urânio, em Bq/g, a partir de resultados de concentração de óxido de urânio, expressos em ppm, em amostras naturais. Já a concentração de atividade do tório pode ser calculada a partir da concentração do óxido de tório, em ppm, aplicando-se a equação (2).

$$CA_{Unat} = \frac{U_3O_8 \text{ ppm}}{1,179} \times 0,0123 \text{ Bq.g}^{-1} \quad (1)$$

$$CA_{Th} = \frac{ThO_2 \text{ ppm}}{1,138} \times 0,00407 \text{ Bq.g}^{-1} \quad (2)$$

A concentração de atividade total de um material ou amostra, por si só, não é capaz de expressar o potencial dano desse material para o ser humano. As bases da limitação de dose, um dos princípios de proteção radiológica, são a dose efetiva e a dose equivalente, que não são grandezas diretamente mensuráveis. Para o cálculo da dose efetiva, é necessária a compreensão de outras grandezas, como as dosimétricas e as de proteção (IRD, 2002).

As grandezas dosimétricas são definidas pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU) e utilizadas para caracterização do campo de radiação. São obtidas a partir de padrões primários e não são utilizadas para fins de limitação de dose, por não considerarem as diferentes sensibilidades de órgãos e tecidos nem as características dos diferentes tipos de radiações que fazem com que, para um mesmo nível de dose, diferentes efeitos biológicos sejam observados. São exemplos de grandezas dosimétricas: kerma (K) e dose absorvida (D).

As grandezas operacionais foram definidas pela ICRU, com o objetivo de fornecer uma estimativa das grandezas de proteção, tendo em vista que essas não são grandezas diretamente mensuráveis. De modo geral, os valores das grandezas ocupacionais são considerados como estimativas razoáveis da dose efetiva e das doses no cristalino e na pele (ICRU, 2020).

O Relatório 95 da ICRU, publicado em 2020 em conjunto com ICRP, apresentou algumas mudanças no conceito das grandezas operacionais. Os coeficientes de conversão agora estão diretamente relacionados aos valores das quantidades de proteção. As grandezas operacionais, agora dose ambiente e dose pessoal, foram redefinidas como o produto da grandeza radiométrica (ou dosimétrica) e do coeficiente de conversão (ICRU, 2020).

As grandezas de proteção, por sua vez, não são diretamente mensuráveis e consistem no pilar da limitação de dose. Definidas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), elas consideram, além da dose, duas novas variáveis no cálculo: o fator de peso do tecido W_T , que considera a radiosensibilidade dos diferentes tecidos e órgãos (Tabela 1) e o fator de peso da radiação W_R , que é estabelecido como uma função da transferência linear de energia na água (perda média de energia por unidade de comprimento) e varia de acordo com tipo de radiação e faixa de energia, conforme Tabela 2 (ICRP, 2019).

Tabela 1 – Fatores de ponderação de órgãos ou tecidos W_T

Tecido ou órgão	Número de tecidos	W_T (valor para órgão)	Contribuição total
Gônadas	1	0,08	0,08
Pulmão, Estômago Colon, Medula Óssea e Mama, Restantes	6	0,12	0,72
Tireoide, Esôfago, Bexiga e Fígado	4	0,04	0,16
Superfície óssea, pele, cérebro, glândulas salivares	4	0,01	0,04

Fonte: Adaptada de ICRP (1991).

Em resumo, a atividade de um radionuclídeo é o número de decaimentos por unidade de tempo, e a dose absorvida é a energia média, em joules, depositada pela radiação por quilograma de massa (J/kg), expresso em Gray (Gy). Quando ponderada a qualidade da radiação de interesse, expressa a dose equivalente (H), e quando ponderada também a sensibilidade do tecido, expressa a dose efetiva (E); ambas têm como unidade o Sievert (Sv) e são grandezas de proteção, utilizadas para a limitação da dose no trabalhador e no público, pois, por considerarem a qualidade da radiação e a radiosensibilidade de órgãos e tecidos, melhor indicam o risco da exposição às radiações em termos de danos biológicos (IRD, 2002).

Tabela 2 – Fator de peso da radiação W_R

Tipo e faixa de energia		Fator de peso da radiação W_R
Fótons, todas as energias		1
Elétrons e múons, todas as energias		1
Prótons e píons carregados		2
Partículas alfa, fragmentos de fissão, núcleos pesados		20
Nêutrons	$E_n < 1 \text{ MeV}$	$2,5 + 18,2 \times e^{-[\ln(E_n)]^{2/6}}$
	$1 \text{ MeV} < E_n < 50 \text{ MeV}$	$5,0 + 17,0 \times e^{-[\ln(2E_n)]^{2/6}}$
	$E_n > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25 \times e^{-[\ln(0,04E_n)]^{2/6}}$

Fonte: Adaptado de ICRP (2003).

3.1.2 Efeitos biológicos da radiação ionizante

Em exposições à radiação de intensidade baixa a moderada, os principais riscos são os efeitos estocásticos, principalmente efeitos somáticos como o câncer, diferentemente dos efeitos de reação tecidual (anteriormente definidos como determinísticos), que são típicos em exposições a doses mais elevadas (LITTLE, 2018). Para os efeitos estocásticos, os comitês científicos, como *National Research Council* (NRC), ICRP e *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR), normalmente partem do princípio de que, mesmo em doses baixas, existe uma resposta linear à radiação, indicando a ausência de um limiar seguro (NRC, 2006; ICRP, 2007; UNSCEAR, 2010).

A compreensão do modelo adotado para a proteção radiológica passa pelo entendimento dos efeitos das radiações ionizantes. De modo geral, os efeitos biológicos das radiações ionizantes podem ser divididos entre reações nos tecidos e efeitos estocásticos. De acordo com Tauhata *et al.* (2014), os efeitos determinísticos eram, então, definidos como efeitos causados por irradiação total ou localizada de um tecido, onde a morte celular não é

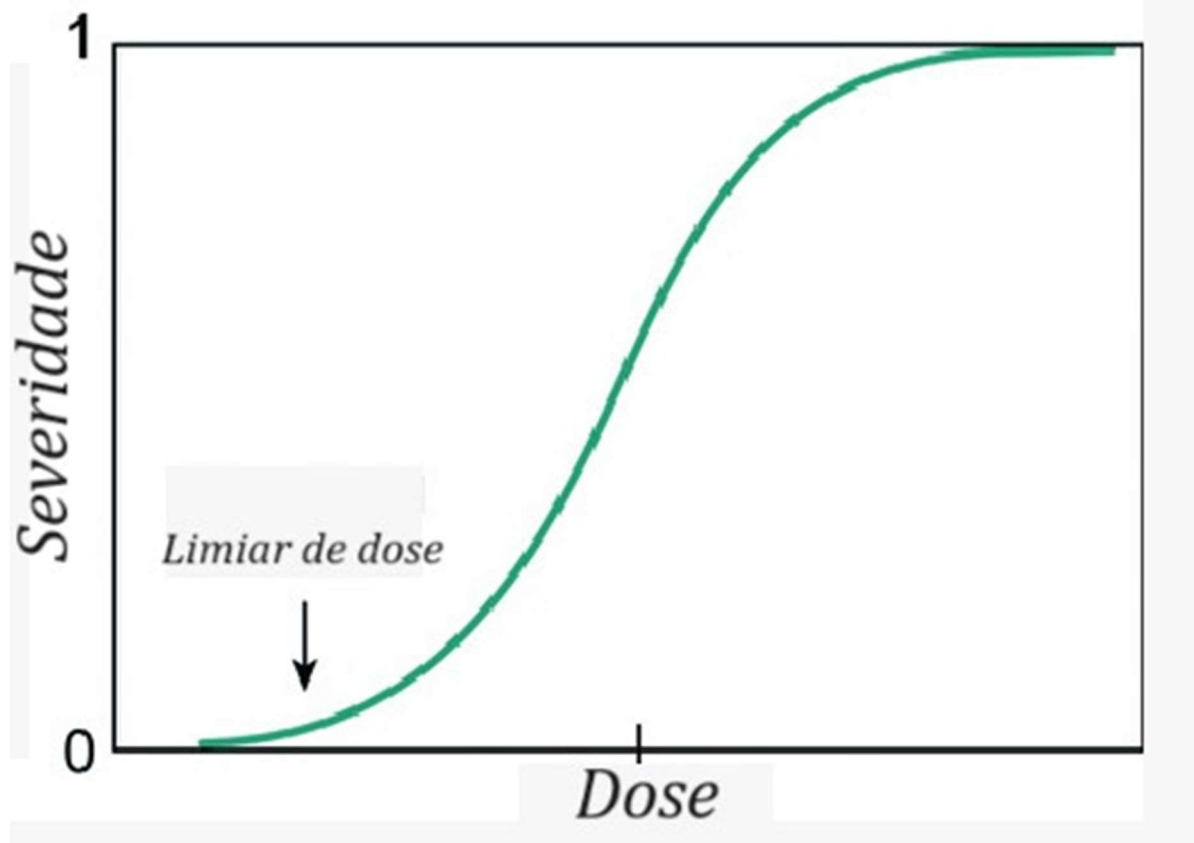
compensada por meio de reposição ou reparo celular, resultando em prejuízos detectáveis ao funcionamento do tecido ou órgão. Para esse efeito, existe um limiar de dose, abaixo do qual a perda de células é insuficiente para gerar prejuízos detectáveis e, acima do limiar, a severidade ou gravidade do dano aumenta conforme a dose aplicada.

De acordo com ICRP (2012), esses efeitos não cancerígenos da radiação, anteriormente chamados de “efeitos determinísticos”, são agora chamados de “reações teciduais” porque é cada vez mais reconhecido que esses efeitos não são determinados somente no momento da irradiação, mas que muitos tipos de reações teciduais podem ocorrer após a exposição à radiação.

A probabilidade de ocorrência desses efeitos é considerada nula para doses abaixo do limiar e 100% para doses acima desse valor (TAUHATA *et al.*, 2014). A Figura 3 apresenta o modelo adotado para reações teciduais no qual, a partir de um limiar, quanto maior a dose, maior a gravidade dos efeitos, até o fim da curva, que representa doses letais.

Os efeitos estocásticos, contudo, não apresentam limiar de dose. De acordo com Tauhata *et al.* (2014), “[...] são efeitos em que a probabilidade de ocorrência é proporcional à dose recebida, sem a existência de limiar. Isto significa que doses pequenas, abaixo dos limites estabelecidos por normas e recomendações de proteção radiológica, podem induzir tais efeitos”. Esses efeitos surgem no longo prazo, pois, nesses casos, as células ainda são capazes de realizar a mitose, contudo, podem resultar em células modificadas, com chances de acarretar o surgimento de câncer.

Figura 3 – Relação entre dose e efeito



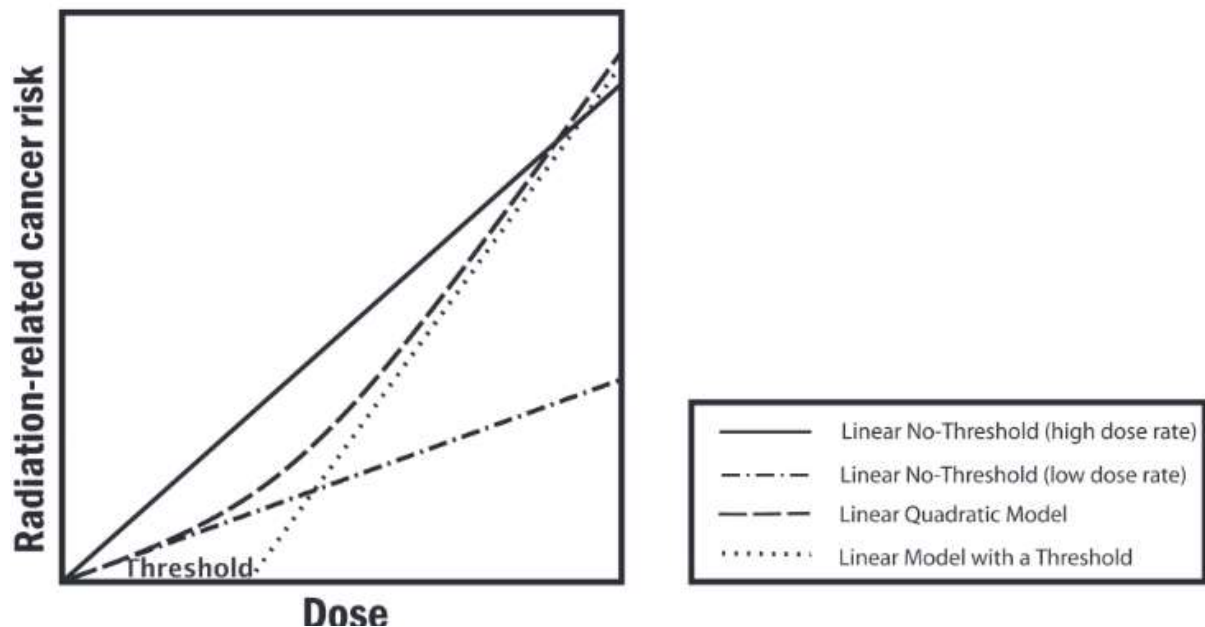
Fonte: WOLBARST *et al.*, 2010.

A relação entre efeito e dose é mais bem conhecida para altas doses, sendo estudada a partir dos efeitos da radioterapia e de acidentes severos que ocorreram com fontes industriais. Para os efeitos estocásticos, as principais fontes de estudos epidemiológicos foram os sobreviventes dos ataques nucleares de Hiroshima e Nagasaki, grupos de pacientes em tratamentos com radiação e alguns grupos de profissionais expostos ocupacionalmente (LAURIER *et al.*, 2023).

Para efeito de proteção radiológica, o modelo adotado por organizações internacionais e agências reguladoras é o Linear sem Limiar (*Linear No-Threshold* – LNT). Tal modelo sugere que quanto maior a dose, maior o risco associado à radiação, com probabilidade de desenvolvimento de câncer, probabilidade essa que não se altera com o fracionamento da dose ao longo do tempo. Matematicamente, o modelo é expresso por $y = ax$, onde y é a incidência de câncer, a , uma constante e x , a dose de radiação (METTLER; UPTON, 2008). Ao analisá-lo, percebe-se que esse é um modelo conservador, ao considerar a probabilidade de incidência de câncer proporcional à dose, e sua utilização abrange todas as situações, inclusive as mais críticas, valorizando as ações de proteção e intervenção. A Figura 4 ilustra os diversos

modelos para a relação dose-risco, sendo o modelo linear sem limiar para baixas taxas de dose representado pela curva com pontos e traços.

Figura 4 – Modelos para representação da relação dose-risco



Fonte: NRC, 2006.

No entanto, há quem defenda que o modelo LNT não representa com precisão o verdadeiro risco, argumentando que a relação seria mais corretamente representada por uma curva que aumenta mais rapidamente do que a linear (supralinear), ou que, na realidade, existe uma dose mínima abaixo da qual nenhum efeito adverso é observado, ou até mesmo que pode haver um efeito positivo (*hormesis*) (ICRP, 2005).

As conclusões do BEIR VII (NRC, 2006) corroboram a utilização do modelo linear sem limiar, admitindo que há evidência científica consistente com a hipótese da relação linear de dose-resposta sem limite para o aparecimento de câncer em humanos. De acordo com o comitê, a exposição a 1 mGy por ano, ao longo da vida, pode acarretar até 1.019 casos de câncer a cada 100 mil pessoas. Considerando o cenário de exposição de 10 mGy/ano, dos 18 aos 65 anos, o número de casos chega a 4.295 para cada 100 mil pessoas, conforme Tabela 3.

O documento conclui que, apesar da existência de um limiar de dose baixo para cânceres em certos tecidos relacionados à exposição à radiação, as evidências atuais não apoiam a ideia de um limiar universal. Nesse contexto, a teoria do modelo LNT continua sendo um fundamento sólido e prudente para a proteção radiológica em cenários de baixas doses e baixas taxas de dose (ICRP, 2005).

Tabela 3 – Risco de incidência e mortalidade devido a tumores sólidos decorrentes da exposição à radiação, em número de casos ou mortes por 100.000 pessoas expostas

Cancer site	1 mGy per Year throughout Life	10 mGy per Year from Ages 18 to 65	1 mGy per Year throughout Life	10 mGy per Year from Ages 18 to 65	Cancer site	1 mGy per Year throughout Life	10 mGy per Year from Ages 18 to 65	1 mGy per Year throughout Life	10 mGy per Year from Ages 18 to 65
<i>Males</i>					<i>Females</i>				
Stomach	24	123	13	66	Stomach	32	163	19	94
Colon	107	551	53	273	Colon	72	368	34	174
Liver	18	93	14	72	Liver	8.7	44	8	40
Lung	96	581	99	492	Lung	229	1131	204	1002
Prostate	32	164	6.3	32	Breast	223	795	53	193
Bladder	69	358	16	80	Uterus	14	19	3.5	18
Other	194	801	85	395	Ovary	29	140	18	91
Thyroid	14	28			Bladder	71	364	21	108
All solid	554	2699	285	1410	Other	213	861	98	449
Leukemia	67	360	47	290	Thyroid	75	139		
All cancers	621	3059	332	1700	All solid	968	4025	459	2169
					Leukemia	51	270	38	220
					All cancers	1019	4295	497	2389

Fonte: NRC, 2006.

Com base nas evidências existentes, a ICRP considera que o aumento da incidência de efeitos estocásticos ocorre com uma probabilidade pequena e proporcionalmente ao aumento da dose de radiação em relação à dose de fundo, para doses anuais inferiores a 100 mSv. A ICRP considera o modelo LNT como a melhor abordagem para a gestão do risco de exposição à radiação e considerando também o “princípio da precaução” (ICRP, 2007).

3.1.3 Proteção radiológica

Atualmente, a associação entre radiação ionizante e efeitos biológicos é amplamente estudada e descrita. Todavia, essa relação não se mostrava com tanta clareza para pesquisadores do século XIX, como Wilhelm Roentgen, que em 1895 descobriu os raios X, Henri Becquerel, que em 1896 observou e descreveu a radioatividade a partir de urânio, e Marie e Pierre Curie, que descobriram o rádio e conduziram pesquisas sobre radioatividade (AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, c2020).

A descoberta dos raios X e da radioatividade é considerada um dos marcos da medicina e da física, mas esses recursos foram prontamente empregados para diversas finalidades, algumas das quais, hoje, injustificadas, como a utilização de raios X para fotografar, sem justificativa médica, ossos de mãos e pés e o uso de materiais radioativos em acessórios, produtos pessoais e fármacos (AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, c2020). Essas aplicações, antes de imprudentes à luz do desenvolvimento atual, demonstram o estado da arte da ciência das radiações à época de seu surgimento e possibilitam acompanhar o desenvolvimento dos principais conceitos de proteção radiológica.

Inevitavelmente, a exposição recorrente e irrestrita à radiação ionizante levou ao aparecimento de lesões. Relatórios descreviam efeitos na pele associados à radiação ionizante. Ainda em 1896, o físico estadunidense Elihu Thomson expôs o dedo mínimo da mão esquerda a raios X, meia hora por dia, por vários dias. Os efeitos resultantes – dor, inchaço, rigidez, eritema e bolhas – convenceram Thomson da relação entre exposição e efeitos biológicos. Entretanto essa visão não era consensual.

No início do século XX, cerca de cinco anos após a descoberta de Roentgen, a maior parte da comunidade médica e científica já se convencera de que a exposição frequente aos raios X causava lesões na pele. A partir da associação entre radiação e efeitos biológicos, começaram as primeiras iniciativas na tentativa de evitar esses efeitos, e a redução do tempo e da frequência de exposição foi uma das formas de limitação da dose, decorrente das evidências apontadas. Outras técnicas de proteção encontradas para minimizar a exposição foram a blindagem do tubo, uso de écrans intensificadores e colimação.

Na medida em que mais relatos foram surgindo e os efeitos passaram a ser mais observados, foi aumentada a preocupação e evidenciada a necessidade de se estabelecer diretrizes para as exposições. Em 1925 realizou-se em Londres o Primeiro Congresso de Radiologia, onde foi lançada o que mais tarde seria a Comissão Internacional de Medidas e Unidades Radiológicas (ICRU). Também é desse ano a proposta de Rolf Sievert para uma dose anual de tolerância, que seria de 10% da dose para eritema.

Três anos após o Primeiro Congresso, foi realizado em Estocolmo o Segundo Congresso de Radiologia, onde foi criada a instituição que se tornaria a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP). Foi nesse segundo encontro que surgiram as primeiras recomendações sobre proteção radiológica. Em 27 de julho de 1928 foram recomendados limites de dose – dose de tolerância para raios X de 0,2 R/dia na superfície do corpo – e medidas de proteção para trabalhadores. Segundo o documento, para evitar os males decorrentes da superexposição aos raios X e ao rádio:

As seguintes horas de trabalho etc. são recomendadas para trabalhadores de tempo integral, com raio X e rádio:

- a. Não mais que sete horas de trabalho por dia.
- b. Não mais que cinco dias de trabalho por semana.
- c. Não menos que um mês de férias por ano.
- d. Trabalhadores de tempo integral no raio-x de hospitais e departamentos de rádio não deveriam trabalhar para outros serviços hospitalares. (ICR, 1929, tradução livre).

Os conceitos de proteção introduzidos por essa recomendação, ainda que não permaneçam os mesmos em termos quantitativos, continuam presentes nas recomendações

internacionais atuais e, inclusive, nas normas trabalhistas brasileiras. Desde então, outras publicações incorporaram novos conceitos e restrições, estabelecendo as bases da proteção radiológica, tal qual a conhecemos hoje.

A Publicação 2 do ICRP, por exemplo, assume que as exposições internas, tanto quanto as externas, podem ser mensuradas e limitadas (ICRP, 1960). A Publicação 26 (ICRP, 1977) é outro marco importante para a radioproteção; ela estabelece a distinção entre efeitos estocásticos e determinísticos e introduz os princípios de proteção radiológica: justificção, otimização e limitação de dose.

De uma perspectiva histórica, nota-se que o foco e as prioridades em proteção radiológica mudaram ao longo do tempo, de um foco voltado para a proteção de profissionais de saúde para um foco na energia nuclear, voltado para a proteção de indivíduos do público e trabalhadores de instalações nucleares. Isso levou à criação de um sistema robusto, com princípios e diretrizes que visavam proteger indivíduos dos efeitos danosos da energia nuclear, que se refletiu na Publicação 60 da ICRP (1991).

A ocorrência de acidentes nucleares, aliada à possibilidade de eventos de ameaça à segurança e ao aumento da preocupação com exposições naturais e situações de exposições passadas, provocou na década de 1990 uma reavaliação do sistema estabelecido na Publicação 60 (ICRP, 1991). Essa revisão levou ao desenvolvimento dos princípios fundamentais que foram posteriormente apresentados na Publicação 103 (ICRP, 2007).

O sistema de proteção radiológica vigente, baseado na ICRP 103, se organiza em três princípios fundamentais, três categorias e três situações de exposição. Os princípios expressam bases para determinar quando e como é seguro realizar práticas que aumentem a exposição à radiação; as situações de exposição agrupam em três categorias os diferentes tipos de instalações e atividades que podem inserir ou modificar a exposição à radiação ionizante; e as categorias de exposição dizem respeito aos sujeitos expostos, sendo importante na definição da proteção de cada um (ICRP, 2007).

3.1.4 Princípios de proteção radiológica

Em 1990, a ICRP estabeleceu princípios de proteção radiológica para práticas e intervenções. As práticas foram definidas como atividade humana que introduz fontes ou vias de exposição, que estende a exposição a mais pessoas ou, ainda, que modifica o conjunto de vias de exposição devido a fontes existentes, aumentando a probabilidade de exposição (CNEN, 2014). Já o conceito de intervenção aplicava-se às ações adotadas com o objetivo de

reduzir ou evitar exposição ou probabilidade de exposição a fontes que não façam parte de uma prática controlada, ou que estejam fora de controle em consequência de um acidente, terrorismo ou sabotagem (CNEN, 2014). Embora a Publicação 103 não adote o conceito de prática como utilizado no Basic Safety Standards nº 115 (IAEA, 1996), os princípios continuam sendo considerados essenciais para o sistema de proteção radiológica, sendo eles: justificação, otimização e limitação de dose (ICRP, 2007).

O princípio da justificação implica que toda decisão que modifica a exposição à radiação deve trazer mais benefícios do que malefícios. Isso significa que, ao introduzir uma nova fonte de radiação, ao diminuir a exposição existente ou ao atenuar o risco de exposições futuras é essencial que o ganho, individual ou coletivo, compense os danos causados (ICRP, 2007).

O princípio da otimização estabelece que é fundamental que a probabilidade de exposição à radiação, a quantidade de pessoas expostas e o nível das doses de radiação recebidas por cada indivíduo sejam reduzidos ao mínimo possível, considerando-se aspectos econômicos e sociais. Isso significa que o grau de proteção deve ser o mais eficaz possível nas condições existentes, priorizando o aumento dos benefícios em relação aos danos (ICRP, 2007).

O princípio da limitação de dose é relacionado ao indivíduo e preza para que a quantidade total de radiação recebida por uma pessoa, originária de fontes controladas em cenários de exposição planejada – excluindo a radiação utilizada em tratamentos médicos para pacientes – não deve ultrapassar os limites estabelecidos (ICRP, 2007). A Tabela 4 apresenta os limites de dose recomendados pela ICRP ao longo dos anos.

Tabela 4 – Comparação dos limites de dose recomendados pela ICRP

Limites de exposição	ICRP 26	ICRP 60	ICRP 103
Ocupacional	50 mSv/ano	20 mSv/ano, em média de 5 anos, 50 mSv em qualquer ano	20mSv /ano, em média de 5 anos, 50 mSv em qualquer ano
Público	5 mSv/ano	1 mSv/ano	1 mSv/ano

Fonte: Adaptado de Sinclair (1995).

3.1.5 Categorias de exposição

A ICRP distingue três categorias de exposições: exposições ocupacionais, exposições do público e exposições médicas de pacientes. As exposições médicas de pacientes acontecem em procedimentos de diagnóstico, intervencionismo ou terapia e, por esse, motivo, não são

objeto deste trabalho. As exposições do público englobam todas as exposições de indivíduo do público, exceto as exposições ocupacionais e as exposições médicas de pacientes (ICRP, 2007).

A exposição ocupacional é definida pela Comissão como toda exposição de trabalhadores à radiação em decorrência de seu trabalho. Contudo, dada a ubiquidade dos radionuclídeos naturais, e por conseguinte, da exposição deles decorrentes, a ICRP recomenda limitar a aplicação do conceito de exposição ocupacional para as situações que podem ser consideradas de responsabilidade do titular ou empregador, desconsiderando exposições decorrentes de práticas ou fontes isentas, assim como exposições excluídas do controle regulatório (ICRP, 2007).

3.1.6 Situações de exposição

De acordo com a ICRP (2007), as situações de exposição planejada referem-se à utilização intencional e ao manejo de fontes de radiação, podendo resultar em exposições previstas (normais) ou potenciais. As situações de exposição de emergência são situações que podem ocorrer durante a operação de uma situação planejada, em decorrência de um ato malicioso, ou de qualquer outra situação inesperada, e exigem ação urgente para evitar ou reduzir consequências indesejáveis. Já as situações de exposição existente dizem respeito a situações de exposição que já existem quando uma decisão sobre o controle deve ser tomada, incluindo exposições crônicas após emergências (ICRP, 2007).

As definições da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) para as situações de exposição são semelhantes às da ICRP, com diferença na definição de situação de exposição planejada, definida como “a situação de exposição decorrente da operação planejada de uma fonte ou de uma atividade planejada que resulte em uma exposição devido a uma fonte” (IAEA, 2014, tradução livre). A definição é complementada com a explicação de que medidas de proteção e segurança podem ser adotadas desde o início da atividade, restringindo as exposições e probabilidades de ocorrência, por meio da adequação do projeto, de equipamentos e/ou de procedimentos operacionais. Ressalta ainda que, nas situações de exposição planejada, espera-se que ocorra um determinado nível de exposição (IAEA, 2014).

Como visto, a condição definida pela AIEA para classificação de uma situação de exposição como planejada é a possibilidade de previsão de exposições e adoção precoce de medidas de proteção, seja por meio de design, equipamentos ou procedimentos. A ICRP (2007) também considera a previsibilidade da exposição ao dizer que situações de exposição

planejada são aquelas em que a proteção radiológica pode ser planejada com antecedência e a magnitude e a extensão das exposições podem ser razoavelmente previstas.

Adicionalmente, a ICRP determina a intenção como outra condição para a classificação das situações de exposição planejada. Assim, ainda que haja previsibilidade da exposição e de sua magnitude e exista a possibilidade de adoção antecipada de medidas de proteção, também se impõe a condição de que a introdução ou operação da fonte seja deliberada (ICRP, 2007).

Essa distinção conceitual tem impacto na classificação das instalações de mineração e beneficiamento mineral que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural. A AIEA define a atividade de mineração e beneficiamento mineral como uma situação de exposição planejada ao determinar que: “Os requisitos para situações de exposição planejada se aplicam às seguintes práticas: [...] (f) A mineração e o processamento de matérias-primas que envolvem exposição a materiais radioativos [...]” (IAEA, 2014, p. 29).

A ICRP, de modo distinto, considera que a mineração e o processamento de minérios que contêm radionuclídeos de origem natural são situações de exposição existente. A Publicação 103 (ICRP, 2007) cita que o radônio em residências ou no local de trabalho e o material radioativo de ocorrência natural (em inglês *Naturally Occurring Radionuclides Material*, comumente tratado na literatura pelo acrônimo NORM) são exemplos bem conhecidos de exposições existentes. A Publicação 142 (ICRP 2019) corrobora a classificação das instalações que processam matérias-primas contendo materiais radioativos de ocorrência natural como situação de exposição existente e apresenta abordagem para lidar com proteção radiológica nesse contexto.

Ambas as classificações (ICRP e AIEA) pressupõem adoção de medidas de proteção radiológica e controle regulatório, quando necessário. Contudo, a diferença na categorização não é mera escolha etimológica. Nas situações de exposição existente, a proteção é alcançada por meio da justificação da adoção de medidas de proteção e pela otimização da dose com foco numa abordagem relacionada à fonte. Nas situações de exposição planejada, além das abordagens citadas, há também a aplicação do princípio de limitação de dose, com avaliação de dose relacionada ao indivíduo (ICRP, 2007).

De acordo com Loy (2015), existem argumentos razoáveis para classificação das instalações que lidam com materiais radioativos de ocorrência natural tanto como situação de exposição planejada quanto como situação de exposição existente. De um lado é certo que o material radioativo é existente, e a exposição é incidental a outro propósito, não sendo, nesse

sentido, planejada. Por outro lado, a probabilidade de exposições decorrentes das atividades é conhecida antecipadamente e medidas de proteção podem ser planejadas.

3.2 Radioatividade natural

Neste tópico serão abordados alguns conceitos básicos e definições relacionados à radioatividade natural e apresentadas as principais indústrias que processam materiais que contêm radionuclídeos de ocorrência natural.

3.2.1 Conceitos básicos e definição

A descoberta dos raios X em 1895 e da radioatividade em 1896 foram grandes marcos para a física e para medicina. Entretanto, diferente dos raios X, a radioatividade sempre esteve presente em nosso mundo. O ser humano sempre esteve sujeito a uma exposição contínua à radiação devido às fontes naturais, de origem cósmica, cosmogênica e terrestre.

A radiação cósmica tem origem fora da atmosfera terrestre, a partir do fluxo de radiação emitido constantemente pelo Sol e por outras estrelas. É formada principalmente por prótons (87%), partículas alfa (11%) e elétrons de alta energia (1%) e se caracteriza por ser bastante penetrante, com energia de até 10^{20} elétronvolts (eV) (ICRP, 2016).

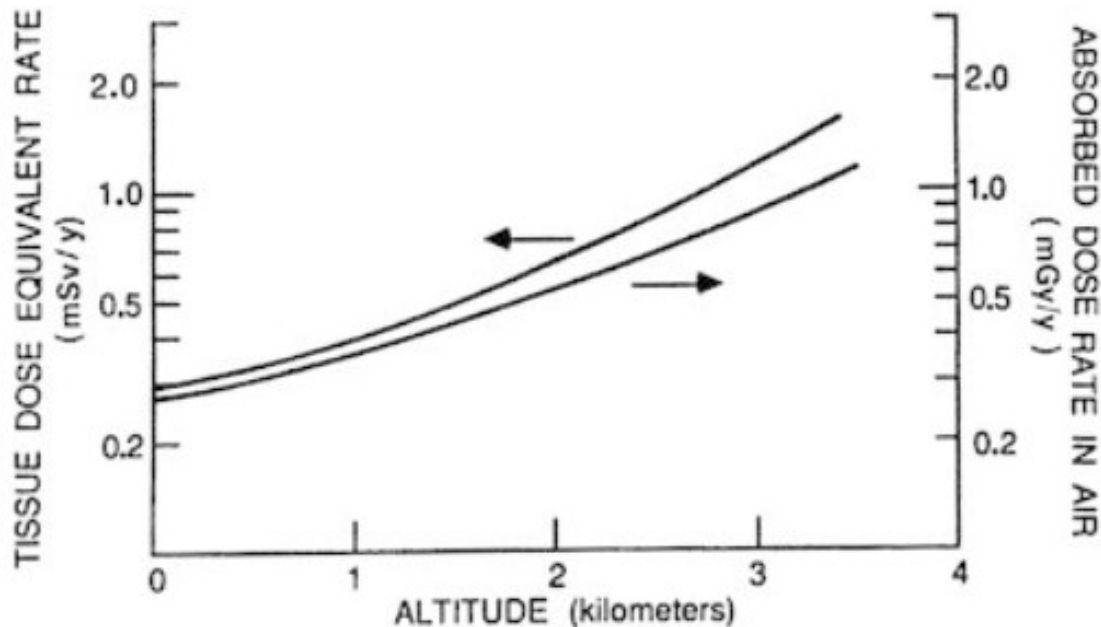
Além de ser influenciada pelos ciclos solares (que se completam a cada 11 anos), a radiação cósmica varia com a altitude, sendo mais concentrada na estratosfera, em altitudes superiores a 25 km (ICRP, 2016). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos, 5% da radiação a que os estadunidenses estão expostos é devida à radiação cósmica (EPA, 2019).

A radiação cosmogênica, por sua vez, tem origem na interação da radiação cósmica com os núcleos estáveis presentes na atmosfera. Os radionuclídeos cosmogênicos mais comuns são ^{26}Al , ^{14}C , ^{36}Cl , ^3H , ^{32}Si , ^{10}Be e ^7Be , que estão presentes nos oceanos e continentes a partir do processo de dispersão por meio de chuvas ou associados a outras partículas (AIREY; HINTON; TWINING, 2012).

As radiações cósmica e cosmogênica e, conseqüentemente, as doses devido a esses tipos de radiação, dependem de fatores geográficos, tais como latitude e altitude (ICRP, 2016), o que tem gerado uma preocupação com a exposição ocupacional de tripulações de companhias aéreas. De acordo com a ICRP (2016), em voos comerciais, a taxa de dose varia de 2 a 10 mSv/h, dependendo da altitude e latitude (Figura 5). Embora seja uma taxa de dose

baixa comparada a outras atividades, a avaliação da exposição ocupacional é recomendada, devido à carga horária das tripulações (ICRP, 2016).

Figura 5 – Variação na taxa de equivalente de dose em relação à altitude (representada na curva superior)

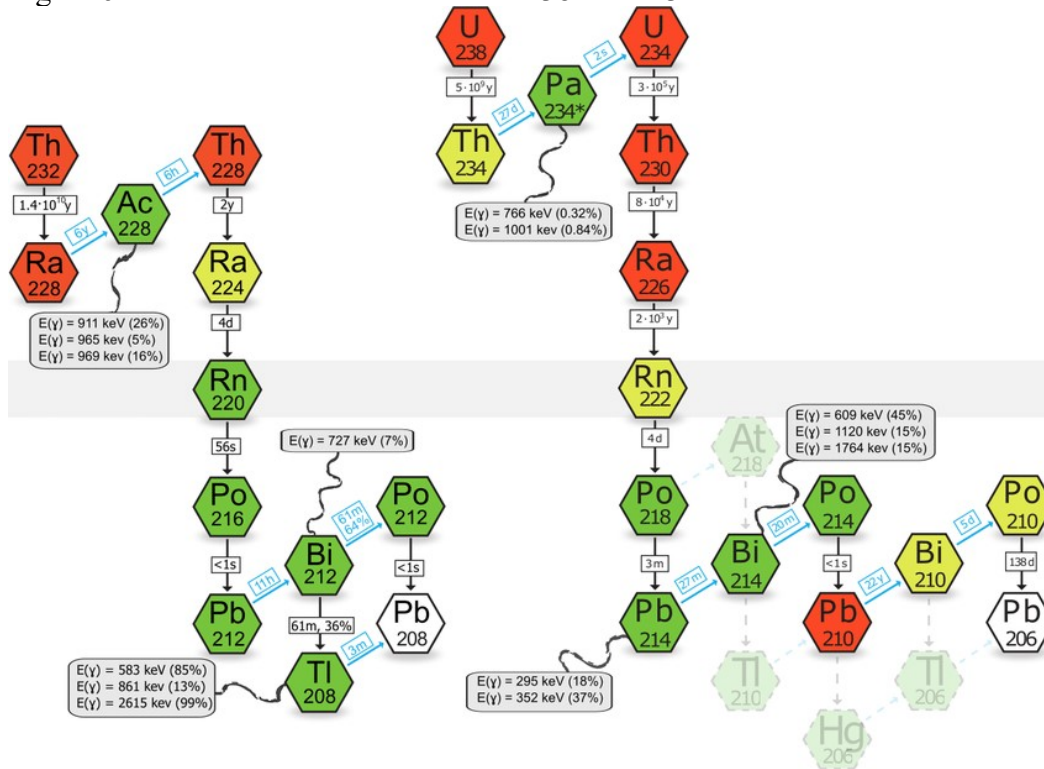


Legenda: Curva inferior representa variação da taxa de dose absorvida no ar em relação à altitude.
Fonte: ICRP, 2016.

A radiação terrestre, também chamada de radiação primordial, está presente desde a formação do planeta. De acordo com Eisenbud e Gesell (1997), são quatro os radionuclídeos primordiais remanescentes: U-238, U-235, Th-232 e K-40. O K-40 tem meia-vida de $1,248 \times 10^9$ anos, decaindo em 89,28% das vezes em ^{40}Ca e em 10,72% em ^{40}Ar , ambos nuclídeos estáveis, sendo assim, é o radionuclídeo primordial que não possui uma cadeia de decaimento. O U-238, o U-235 e o Th-232, por sua vez, decaem gerando outros radionuclídeos, chamados secundários. A Figura 6 apresenta as cadeias de decaimento do U-238 e Th-232, com os radionuclídeos gerados e respectivos tempos de meia-vida.

A concentração dos radionuclídeos primordiais não apresenta grandes variações na crosta terrestre; entretanto, há regiões anômalas, devido ao tipo de rocha e ao seu processo de formação. A abundância média de urânio em diferentes tipos de rochas varia de 0,01 ppm em peridotitos a 53 ppm em xistos; entretanto, em minerais de rochas ígneas essas concentrações podem chegar a intervalos de 500 a 3.000 ppm na monazita e de 100 a 6.000 ppm em zirconitas (BOURDON *et al.*, 2003).

Figura 6 – Cadeias de decaimento do U-238 e Th-232



Fonte: PEREZ-PEREZ *et al.*, 2022.

No presente trabalho, o termo “radionuclídeos de ocorrência natural” será empregado conforme glossário da AIEA, que o define como “radionuclídeos de origem natural que ocorrem naturalmente na Terra em quantidades significativas” (IAEA, 2022, p. 174, tradução livre), explicando que o termo é normalmente utilizado para se referir aos radionuclídeos primordiais e seus produtos de decaimento.

Outro termo importante é “material radioativo de ocorrência natural”, definido como material radioativo que não contém quantidades significativas de radionuclídeos outros além dos de ocorrência natural (IAEA, 2022, p. 131). Na literatura internacional, o acrônimo NORM, de *Naturally Occurring Radionuclides Material*, é amplamente utilizado.

3.2.2 Principais indústrias que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural

Embora estejam presentes em praticamente todos os materiais e, em geral, não sejam motivo de preocupação do ponto de vista de proteção radiológica, os radionuclídeos de ocorrência natural podem se concentrar em processos de algumas atividades, aumentando a exposição à radiação ionizante (LECOMTE, 2020). De acordo com a AIEA, qualquer operação de mineração ou outra atividade industrial envolvendo um mineral ou matéria-prima

de origem mineral tem o potencial de aumentar a dose efetiva recebida por indivíduos, como resultado da exposição a radionuclídeos de origem natural contidos em ou liberados por tal material. Quando esse aumento na dose é significativo, podem ser necessárias medidas de proteção radiológica para proteger trabalhadores e/ou membros do público (IAEA, 2006).

Ainda que sejam frequentemente denominadas de indústrias NORM, ou indústrias relacionadas a NORM, essas instalações e atividades são diversas e não se limitam a um setor em si. São atividades variadas que vão desde a extração e processamento mineral, passando pela fabricação de produtos até a reutilização e reciclagem de resíduos. As matérias-primas também são diversas, apresentando os mais variados processos industriais e diferentes concentrações de atividades que, conseqüentemente, refletem na concentração de atividade em produtos, efluentes e resíduos (LECOMTE, 2020).

A ICRP (2019) e a AIEA (2006) elencam algumas atividades industriais que mais comumente ensejam a adoção de medidas de proteção radiológica. O Quadro 1 apresenta os setores industriais que podem causar exposição de trabalhadores e do público à radiação relacionada à radionuclídeos de ocorrência natural.

No Brasil, as instalações de lavra, beneficiamento ou industrialização de minérios, matérias-primas e demais materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural das séries do urânio e do tório são denominadas instalações minero-industriais (CNEN, 2016). Assim, considerando que o processamento de radionuclídeos se dá de maneira incidental e que atividades e instalações em que pode haver necessidade de adoção de medidas de proteção são variadas, ao invés de falar em indústrias NORM ou indústrias que processam radionuclídeos naturais, neste trabalho serão utilizados os termos: instalação minero-industrial que processam minérios, matérias-primas e demais materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural, ou apenas instalação minero-industrial, ou ainda instalações e atividades de processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural.

Quadro 1 – Atividades industriais que podem intensificar a concentração de radionuclídeos naturais

Extração de elementos de terras raras	Produção e uso de tório metálico	Mineração e processamento mineral (de minérios que não urânio e tório)
Indústria de petróleo e gás	Produção de pigmentos de dióxido de titânio	Mineração e processamento de fosfato
Indústria de zircônio e zirconita	Processamento de metais, tais como estanho, cobre, ferro, alumínio, tântalo/nióbio, bismuto.	Combustão de combustíveis fósseis

Tratamento de água	Produção de energia geotermal	Materiais de construção (incluindo os produzidos a partir de resíduos ou coprodutos)
--------------------	-------------------------------	--

Fonte: Adaptado de ICRP (2019).

É importante destacar que a diversidade de instalações e atividades que processam materiais radioativos de ocorrência natural, conforme interpretada por organizações internacionais (Quadro 1), é mais abrangente do que o escopo regulatório da Norma CNEN-NN-4.01 para “instalação minero-industrial”. Os resíduos da indústria de óleo e gás, por exemplo, são encarados sob a perspectiva da gestão e deposição de rejeitos, seguindo normas de rejeitos radioativos.

O mesmo ocorre com a mineração e o beneficiamento de urânio, que, embora seja classificada como uma instalação minero-industrial nuclear de acordo com a Lei nº 14.514, de 29 de dezembro de 2022 (BRASIL, 2022), é uma atividade classificada como nuclear (CNEN, 1989).

3.3 Riscos associados a instalações e atividades que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural e acidentes de trabalho

Dos diversos riscos inerentes às instalações minero-industriais, o risco radioativo nem sempre é o mais significativo. No contexto ocupacional, os trabalhadores enfrentam uma gama de condições, tais como exposição à poeira e particulados, temperaturas elevadas, níveis altos de ruído e vibração, riscos de acidentes e de lesões devido ao uso de equipamentos pesados, e contato com produtos químicos perigosos (LECOMTE, 2020).

No Brasil, de acordo com dados o Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho de 2022, conforme apresentado na Tabela 5, a indústria extrativa de carvão mineral; estanho; outros minerais metálicos; fertilizantes e adubos; e outros minerais não metálicos apresentaram taxas de letalidade e mortalidade superiores à média das atividades nacionais. A incidência de acidentes típicos, é maior que média nacional em todas as indústrias citadas, com exceção da extração de outros minerais metálicos não ferrosos. Os acidentes com incapacidade temporária também são numerosos, estando abaixo da média nacional apenas nas indústrias de extração de minérios de estanho e de outros minerais metálicos não ferrosos. A incidência de doenças ocupacionais, por outro lado, é inferior à média nacional, de 0,6 por 1.000 vínculos. Essa caracterização nos mostra que estas são indústrias em que há riscos para

trabalhador e que acidentes, em comparação com outras atividades, são mais letais (MPS, 2024).

Tabela 5: Indicadores de acidentes de trabalho do ano de 2022

Descrição da atividade	Extração de carvão mineral	Extração de minério de estanho	Extração de outros minerais metálicos não ferrosos (excluídos minerais de estanho, alumínio, manganês, metais preciosos e radioativos)	Extração de minerais para fabricação de adubos, fertilizantes e outros produtos químicos	Extração de outros minerais não metálicos (excluído sal marinho e gemas)	Todas as atividades
CNAE	0500-3	0722-7	0729-4	0891-6	0899-1	-
Incidência (por 1.000 vínculos)	45,73	12,81	12,58	22,46	20,14	14,13
Incidência de Doenças Ocupacionais (por 1.000 vínculos)	0,3	-	0,22	-	0,53	0,6
Incidência de Acidentes Típicos (por 1.000 vínculos)	37,12	11,21	8,88	19,1	15,16	9,13
Incidência de Incapacidade Temporária (por 1.000 vínculos)	40,09	6,41	4,88	19,81	16,43	10,85
Taxa de Mortalidade (por 100.000 vínculos)	29,69	-	7,4	-	31,8	6,19
Taxa de Letalidade (por 1.000 acidentes)	6,49	-	5,88	-	15,79	4,38
Acidentalidade para a faixa 16 a 34 anos (por 100 acidentes)	56,49	62,5	40,59	49,61	45,26	45,58

Fonte: Adaptado de Ministério da Previdência Social, 2024

Do ponto de vista ambiental, essas atividades industriais também podem causar impactos negativos, incluindo a contaminação das águas, perturbações nos ecossistemas, mudanças na topografia e qualidade do solo, e desafios relacionados à gestão de resíduos. Sob a ótica social, a exploração mineral pode levar ao deslocamento de comunidades, problemas de saúde pública, conflitos socioambientais e vulnerabilidades econômicas (LECOMTE, 2020).

Ainda, as instalações e atividades que processam materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural têm potencial de aumentar a exposição ou vias de exposição a radionuclídeos. Nesses casos, a gestão dos riscos radiológicos deve ser feita em conjunto com outros riscos, e as medidas de proteção aplicadas devem ser adequadas à sua intensidade (LECOMTE, 2020).

Devido aos níveis de atividade, as doses geralmente não ultrapassam 20 mSv/ano, de forma que as indústrias que manuseiam esses materiais geralmente não estão sujeitas a riscos de emergências radiológicas capazes de causar danos imediatos aos tecidos ou ameaçar a vida. No entanto, em certos casos, a exposição contínua e significativa de trabalhadores e de indivíduos do público pode ocorrer se medidas de controle eficazes não forem implementadas. A liberação de altas quantidades de materiais contendo radionuclídeos naturais também pode resultar em danos ambientais, abrangendo aspectos radiológicos e não radiológicos (LECOMTE, 2020).

Os riscos da exposição à radiação e a corroboração do modelo linear sem limiar, que expressa o risco mesmo para baixas doses de radiação, são indicações consistentes da necessidade de minimizar os riscos devido à exposição às radiações ionizantes. No caso de exposição às radiações naturais, nem toda fonte de exposição é passível de ser controlada e, conseqüentemente, de ter riscos minimizados. De acordo com a AIEA, “[...] qualquer exposição cuja magnitude ou probabilidade não seja passível de controle por meio de requisitos regulatórios, é considerada excluída do controle regulatório.” (IAEA, 2006, p. 5). Exemplos são a exposição a ^{40}K no corpo, a de radiação cósmica na superfície da Terra e as concentrações não modificadas de radionuclídeos na maioria das matérias-primas.

Há casos de exposição à radiação natural em que esse controle é possível, notadamente nos casos de atividades nas instalações de mineração e processamento mineral, onde pode haver aumento da concentração de radionuclídeos naturais, aumentando assim a exposição de trabalhadores e de indivíduos do público. O controle pode ser feito a partir da identificação do termo fonte e das vias de exposição, tanto em termos de impacto radiológico ocupacional quanto ambiental.

Para o trabalhador, as principais vias de exposição são a externa, devido à radiação gama, a interna, por inalação e ingestão de poeira, e a exposição ao gás radônio e sua progênie, principalmente em minas subterrâneas (ARPANSA, 2011).

Para o risco ambiental, análise de impacto radiológico ambiental, definida como o processo de estimar dose e risco decorrentes de materiais radioativos no meio ambiente para os seres humanos, é necessária para a avaliação do impacto. Os materiais radioativos são

geralmente liberados de uma fonte, natural ou artificial, e por meio do transporte podem se concentrar em algumas matrizes ambientais. O objetivo da análise radiológica ambiental é estimar doses para o indivíduo do público, visto que é quem estará exposto aos materiais radioativos liberados no meio ambiente (TILL; GROGAN, 2008). Em relação ao impacto radiológico ambiental, de modo geral, parte-se do princípio de que a proteção adequada para seres humanos garante nível aceitável de proteção das demais espécies (ARPANSA, 2011).

Assim, a análise de vias de exposição e a avaliação do risco radiológico ambiental têm como objetivo estimar doses para o indivíduo do público. Nesse caso, as principais vias de exposição decorrentes de instalações que processam materiais contendo radionuclídeos naturais são as descargas de efluentes, os resíduos, os rejeitos, a utilização de materiais de construção e os sítios contaminados por atividades passadas.

3.4 Proteção radiológica aplicável a indústrias que lidam com materiais contendo radionuclídeos de ocorrência natural

No Brasil, as instalações minero-industriais são licenciadas pelo órgão ambiental competente – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) ou órgãos estaduais – e, no caso da mineração, há a fiscalização das atividades de pesquisa e lavra por parte da Agência Nacional de Mineração (ANM). Nas hipóteses em que o minério lavrado/beneficiado ocorre associado a radionuclídeos, também é necessária a autorização da CNEN (CNEN, 2016).

A CNEN é o órgão responsável por estabelecer normas e regulamentação com vistas à proteção e segurança radiológica. A autarquia foi criada por meio da Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962 (BRASIL, 1962), que delegou à Comissão responsabilidades mais relacionadas ao desenvolvimento da Política Nacional de Energia Nuclear, com foco maior no controle do monopólio de minérios nucleares e seu beneficiamento, enriquecimento e comércio. Também incumbiu à CNEN o estabelecimento de regulamentos e normas de segurança para utilização das radiações e de materiais nucleares. De acordo com a Lei nº 4.118, compete à CNEN:

- I - Estudar e propôr as medidas necessárias à orientação da Política Nacional de Energia Nuclear;
- II - Promover:
 - a) a pesquisa das jazidas de minerais nucleares e o estudo dos processos de seu aproveitamento e utilização;
 - b) a lavra das jazidas dos minérios nucleares;
 - c) o beneficiamento, refino e tratamento químico dos minérios nucleares e seus associados;

- d) o levantamento dos recursos bem como o controle da prospecção e pesquisa das disponibilidades minerais do País que interessem às aplicações da energia nuclear;
- e) a produção e o comércio dos minérios nucleares, materiais férteis, materiais fisséis especiais;
- f) a produção e o comércio de subprodutos nucleares e radioisótopos, cuja compra, venda troca, empréstimo, arrendamento, transporte e armazenamento dependam de licença por ela expedida nos termos desta lei.
- III - Promover e incentivar a preparação de cientistas, técnicos e especialistas nos diversos setores relativos à energia nuclear.
- IV - Estabelecer regulamentos e normas de segurança relativas ao uso das radiações e dos materiais nucleares e à instalação e operação dos estabelecimentos destinados a produzir materiais nucleares ou a utilizar a energia nuclear e suas aplicações e fiscalizar o cumprimento dos referidos regulamentos e normas.
- V - Realizar estudos, projetos, construção e operação de usinas nucleares.
- VI - Opinar sobre a concessão de patentes e licenças relacionadas com o processo para a utilização da energia nuclear.
- VII - Pronunciar-se sobre projetos de acordos, convênios ou compromissos internacionais de qualquer espécie, relativos à energia nuclear.
- VIII - Firmar contratos no País ou no estrangeiro para financiamento das atividades prevista nesta lei, mediante autorização do Poder Executivo (BRASIL, 1962).

Mais de uma década depois, a Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, alterou a Lei nº 4.118/1962 em relação às atribuições da CNEN, ampliando suas competências e especificando mais as atividades de regulação e fiscalização. De acordo com a Lei nº 6.189/1974, cabia à CNEN expedir normas de segurança e proteção relativas a instalações e materiais nucleares; transporte e manuseio de materiais nucleares; tratamento de rejeitos; e construção e operação de instalações nucleares (BRASIL, 1974). Essas atribuições foram modificadas em 1989, por meio da Lei nº 7.781 (BRASIL, 1989), cujas disposições se mantêm como base do arcabouço regulatório até que a Lei nº 14.222 de 15 de outubro de 2021 (BRASIL, 2021a) produza efeitos no que diz respeito à criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN).

Atualmente, identifica-se na CNEN quatro categorias principais de instalações: nucleares, radioativas, minero-industriais e depósitos de rejeitos. A regulação também se estende, com regulamentos específicos, a atividades inerentes a essas instalações, como o transporte de materiais radioativos, gerenciamento de rejeitos e descomissionamento.

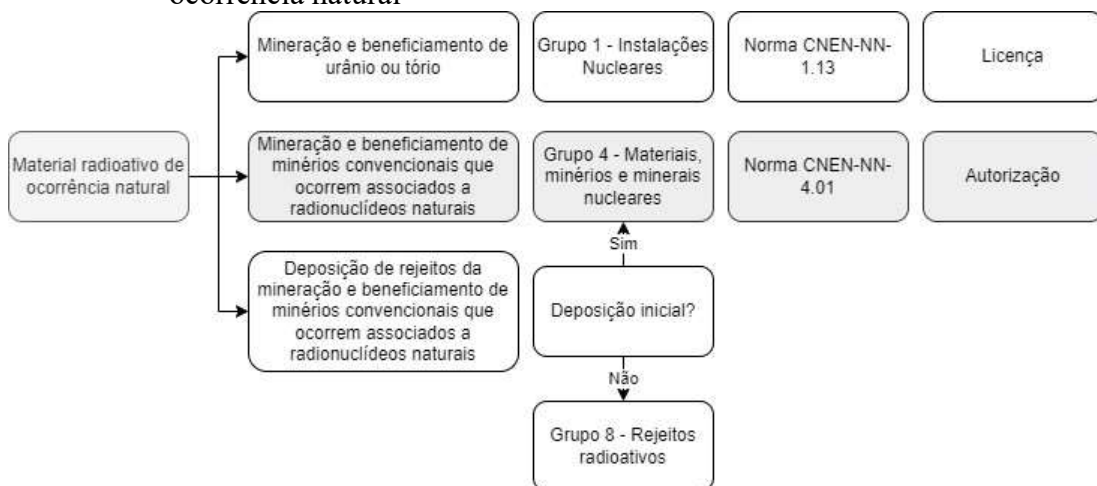
O pilar regulatório da proteção radiológica é a Norma CNEN-NN-3.01 – “Diretrizes básicas de proteção radiológica”. Essa norma especifica os requisitos aplicáveis a todas as práticas, definidas como quaisquer atividades humanas que introduzam fontes de exposição, introduzam ou modifiquem as vias de exposição devido a fontes existentes ou estendam a exposição a mais pessoas, de forma a aumentar a probabilidade de exposição de pessoas ou o número de pessoas expostas. A norma especifica requisitos e medidas necessárias para a proteção radiológica em todas as situações e categorias de exposição.

Em relação aos materiais radioativos de ocorrência natural, a CNEN possui normas distintas para a mineração e o beneficiamento de urânio e para instalações minero-industriais que processam materiais contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e do tório. As instalações de mineração e beneficiamento de urânio são consideradas instalações nucleares, constantes no Grupo 1 (Instalações Nucleares). A estrutura regulatória aplicável a essas instalações é extensa e inclui regulamentações relacionadas à proteção contra radiação, segurança de fontes, segurança de barragens de rejeitos, entre outros. A norma específica para essas instalações é a Norma CNEN-NE-1.13 – “Licenciamento de minas e usinas de beneficiamento de minérios de urânio e/ou tório”, e as etapas do licenciamento incluem a aprovação de local, licença de construção, autorização de uso de material nuclear e autorização de operação (CNEN, 1989).

Os requisitos para proteção radiológica em instalações minero-industriais, definidas como locais nos quais sejam lavrados, beneficiados e/ou industrializados minérios, matérias-primas e demais materiais que contenham radionuclídeos naturais das séries do urânio e do tório, incluindo locais de deposição inicial de resíduos e escórias, são estabelecidos na Norma CNEN-NN-4.01 – “Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações minero-industriais”, do Grupo 4 (Materiais, Minérios e Minerais Nucleares).

A Figura 7 mostra a classificação das normas e as diferenças regulatórias entre as instalações que lidam com materiais radioativos de ocorrência natural.

Figura 7 – Abordagens regulatórias para instalações que lidam com materiais radioativos de ocorrência natural



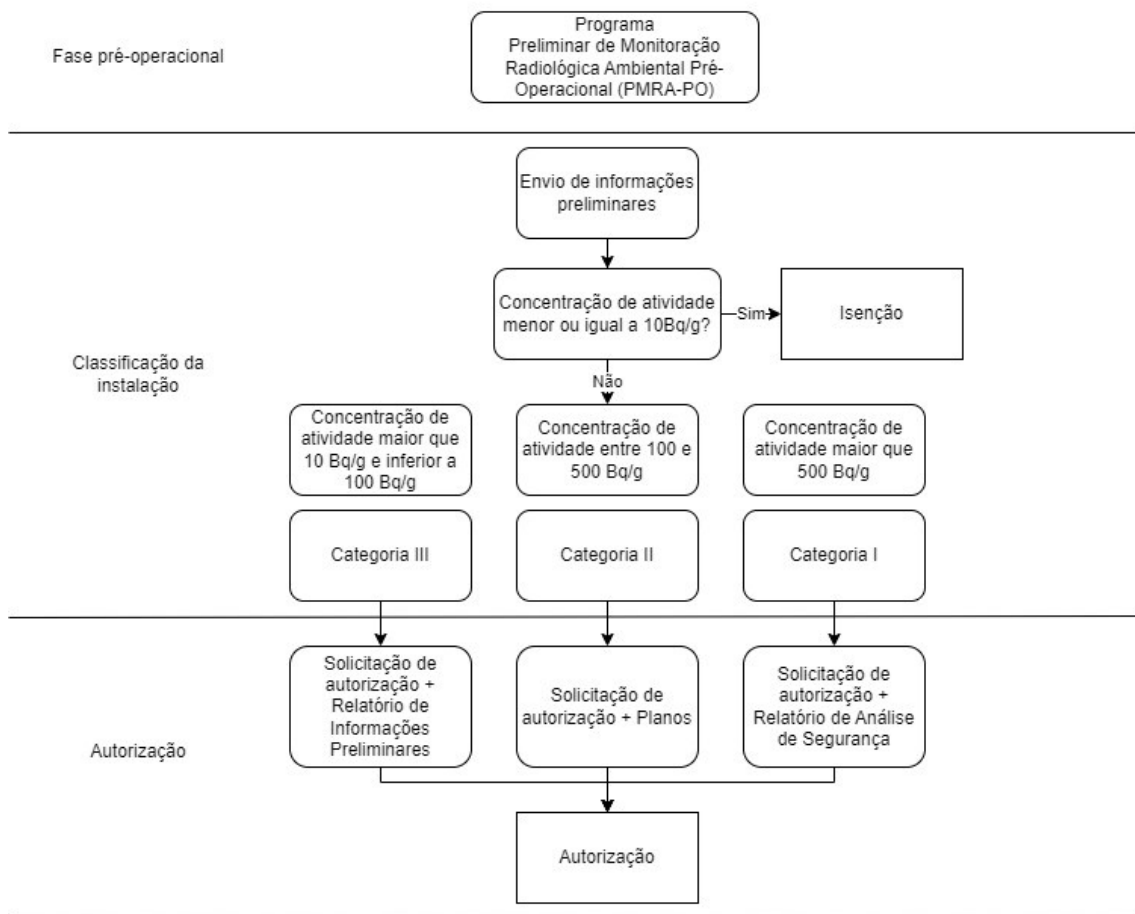
Fonte: A autora, 2024.

A primeira versão da Norma CNEN-NN-4.01 foi publicada em 6 de janeiro de 2005, e sua revisão, em 26 de dezembro de 2016. Na revisão, dentre outros aspectos, foram alterados alguns critérios de classificação e introduzida a necessidade de obtenção de “Autorização para

Posse, Uso e Armazenamento de Minérios, Matérias-Primas e Demais Materiais Contendo Radionuclídeos das Séries Naturais do Urânio e/ou Tório em instalações minero-industriais”, além de sanções para os casos de descumprimento da norma (CNEN, 2016).

O processo de classificação e autorização para instalações minero-industriais é descrito na Figura 8, e será detalhado a seguir.

Figura 8 – Fluxograma do processo de classificação e autorização de instalações minero-industriais



Fonte: A autora, 2024.

A Norma CNEN-NN-4.01 estabelece requisitos de forma gradativa para as instalações, tendo por base sua classificação, feita pela CNEN a partir da concentração de atividade total de radionuclídeos das séries do urânio e do tório (CNEN, 2016). A norma também adota, para fins de isenção, o critério de dose, ao estabelecer em seu artigo 4º que as disposições da norma não se aplicam a:

- III - instalações minero-industriais que apresentem concentração de atividade das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentradas:
 - a) não superior a um valor médio anual de 10 Bq/g, medido durante um período de operação de três anos, desde que o mesmo insumo e os mesmos processos de

extração, beneficiamento e metalúrgico sejam mantidos e que a dose efetiva anual a que possam estar submetidos os seus trabalhadores não ultrapasse 1 mSv; ou
 b) nas quais a dose efetiva anual a que possam estar submetidos os seus trabalhadores não ultrapasse 1 mSv e a dose anual a que esteja submetido o grupo crítico ou o indivíduo representativo não ultrapasse 0,3 mSv (CNEN, 2016).

A caracterização da instalação é feita com base nas informações preliminares fornecidas pelo titular, que devem abranger o definido no art. 7º da Norma CNEN-NN-4.01 (CNEN, 2016), a saber:

- I - origem do minério ou outra matéria-prima contendo urânio e/ou tório a ela associados;
- II - plantas de detalhe, em escala compatível, mostrando:
 - a) localização da mina, das usinas e das bacias de resíduos e rejeitos;
 - b) limites da instalação;
 - c) localização dos depósitos de produtos, estéréis, resíduos, escórias e rejeitos;
 - d) rede hidrográfica local; e
 - e) perímetro da propriedade;
- III - fluxograma simplificado do processo operacional, acompanhado do respectivo balanço de massa e da planta geral da instalação;
- IV - teores medidos ou estimados de urânio natural (U-238 + U-234), tório natural (Th-232), Ra-226, Ra-228 e Pb-210 nos minérios, concentrados, estéréis, rejeitos líquidos e sólidos, resíduos, efluentes, produtos e subprodutos, ligas e escórias;
- V - capacidade nominal da instalação e estoques máximos das matérias-primas contendo urânio, tório e seus descendentes;
- VI - estimativa da solubilidade dos radionuclídeos associados aos resíduos e rejeitos sólidos nos cenários de interesse;
- VII - descrição das instalações de armazenamento de minérios, matérias-primas, produtos, resíduos e rejeitos contendo radionuclídeos; e
- VIII - descrição preliminar do ambiente circunvizinho à instalação, com apresentação das seguintes informações:
 - a) descrição das liberações e dos fluxos de efluentes dos sistemas para o meio ambiente;
 - b) apresentação de mapas, plantas ou desenhos, em escalas adequadas, indicando a existência de corpos receptores (rios e ou lagos) e suas vazões médias anuais;
 - c) descrição dos tipos de lavouras desenvolvidas na área de influência da instalação com eventual uso de irrigação, criação de gado de corte ou leiteiro;
 - d) indicação da existência de aquíferos na área de influência da instalação; e
 - e) dados meteorológicos e direções preferenciais dos ventos na região.

As informações preliminares permitem identificar o tipo, a origem e a caracterização radiológica da matéria-prima; a capacidade produtiva da instalação; o balanço de massa dos radionuclídeos no processo industrial; a quantidade de resíduos e rejeitos gerados; e possibilitam ainda a identificação de matrizes ambientais mais relevantes para a análise de impacto radiológico ambiental e a construção de cenários para estimativa de dose no público.

As instalações que não atendem aos requisitos de isenção são classificadas em três categorias, que definem os requisitos de proteção radiológica para cada instalação:

- Categoria I: instalações com concentração de atividade total de radionuclídeos da série natural de urânio e/ou tório de urânio e/ou tório superior a 500 Bq/g;

- Categoria II: instalações com concentração de atividade total de radionuclídeos da série natural de urânio e/ou tório compreendida entre 500 Bq/g e 100 Bq/g; e
- Categoria III: instalações com concentração de atividade total de radionuclídeos da série natural de urânio e/ou tório de urânio e/ou tório inferior a 100 Bq/g e superior a 10 Bq/g (CNEN, 2016).

O titular de instalações minero-industriais que processam materiais contendo radionuclídeos naturais com concentração de atividade total acima do limite de isenção deve solicitar a autorização da CNEN para posse, uso e armazenamento. Atualmente a solicitação deve ser feita por meio do serviço de “Obter Autorização para instalações minero-industriais que processam materiais com urânio ou tório associados”, disponível no portal gov.br. O titular deve enviar à CNEN a documentação específica da categoria, sendo:

- Categoria I: Relatório de Análise de Segurança Radiológica (RAS), conforme descrito no Anexo I da Norma CNEN-NN-4.01:2016;
- Categoria II: a) Plano de Proteção Radiológica Ocupacional; b) Plano de Monitoração Radiológica Ambiental; c) Plano de Gerência de Rejeitos Radioativos; e d) Plano Preliminar de Descomissionamento Radiológico;
- Categoria III: Informações preliminares, conforme especificadas no art. 7º da Norma CNEN-NN-4.01:2016 (CNEN, 2016).

No caso de instalações em fase de projeto, o titular também deve apresentar à CNEN um Programa Preliminar de Monitoração Radiológica Ambiental Pré-Operacional (PMRA-PO), tomando por base a Norma CNEN-NN-3.01 (CNEN, 2014), compreendendo: a caracterização dos níveis de radioatividade existentes, abrangendo as áreas de potencial impacto e as que servirão de controle na fase operacional; e a identificação das possíveis vias de exposição e estimativa de parâmetros relevantes para a avaliação da dose efetiva do indivíduo do público e do impacto ambiental (CNEN, 2016).

O programa de monitoração radiológica ambiental pré-operacional visa estabelecer concentrações de atividade e níveis de radiação ambiental de “linha de base”, possibilitando determinar posteriormente os impactos da instalação. Serve também de fonte de dados ambientais para a avaliação de doses para o público e impactos no meio ambiente.

A solicitação da Autorização, acompanhada do envio das informações e dos documentos especificados, deve ser requerida por todas as empresas, mesmo aquelas que já estavam em operação na data de entrada em vigor da Norma (CNEN, 2016). Nesses casos, embora não seja possível realizar o programa de monitoração radiológica ambiental pré-

operacional nem conceber medidas de proteção ocupacional na fase de projeto, o processo de autorização permite a análise da necessidade de adoção de medidas de proteção para o trabalhador e para o público de forma corretiva.

A partir da solicitação de autorização e cumpridas todas as etapas descritas, as instalações obtêm a Autorização para Posse, Uso e Armazenamento, desde que a documentação enviada, de acordo com a categoria em que foi classificada, seja considerada adequada. Assim, excetuando a análise de isenção, estabelecida com base nos critérios de concentração de atividade total e de dose, os requisitos para autorização de instalações minero-industriais consideram unicamente o critério de concentração de atividade total.

O processo regulatório das instalações minero-industriais também inclui a realização de fiscalizações e auditorias para verificação de conformidade. Durante a fase inicial de avaliação do pedido de autorização, as inspeções visam primordialmente definir a classificação da instalação de acordo com as categorias preliminarmente definidas, seguindo a Norma CNEN-NN-4.01. Além disso, inspeções são realizadas periodicamente, com frequência variando, idealmente, de acordo com o risco da instalação.

O controle das instalações minero-industriais é multidisciplinar e tanto as análises documentais quanto as inspeções devem considerar diversos aspectos, como o processo industrial envolvido, a exposição ocupacional e a avaliação ambiental, para que as medidas de proteção definidas sejam adequadas ao risco de cada instalação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização das instalações minero-industriais, incluindo dados de dose ocupacional e estimativa de impacto radiológico ambiental, bem como resultados de análises estatísticas da relação entre as variáveis identificadas: concentração de atividade, categoria, dose ocupacional, tipo de minério e tipo de instalação.

4.1 Caracterização das instalações minero-industriais

Foram identificadas nos registros da CNEN 53 instalações minero-industriais. Dessas, sete não dispunham de dados suficientes para a proposta da presente pesquisa. São instalações em fase de projeto, fora de operação ou que não necessitam, no momento, de autorização, sendo, portanto, excluídas do escopo deste trabalho.

Dentre as 46 instalações restantes, verificou-se que 11 são isentas do cumprimento dos requisitos regulatórios estabelecidos para instalações minero-industriais, tendo em vista que apresentaram concentração de atividade total menor que 10 Bq/g. Ao final, o universo caracterizado no presente trabalho abrange 35 instalações minero-industriais.

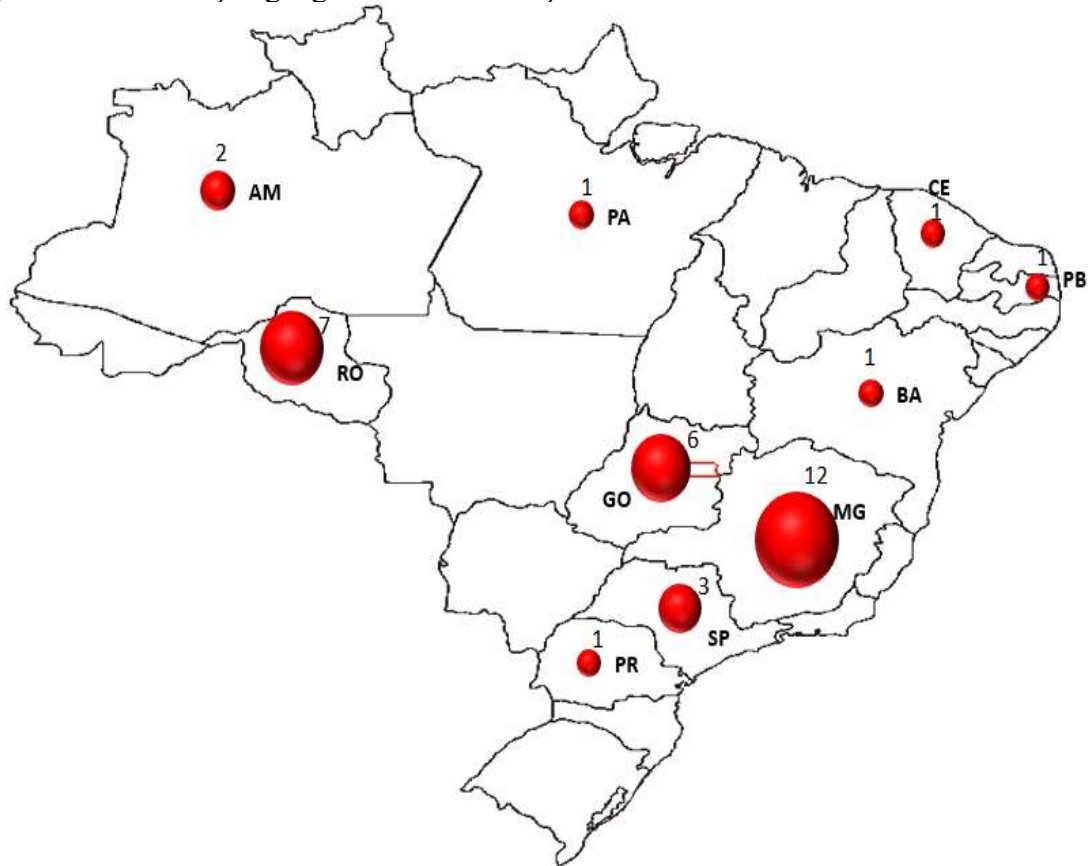
Uma percepção relevante da coleta de dados nos processos de autorização é o impacto de a regulação e a necessidade de Autorização para Posse, Uso e Armazenamento para instalações minero-industriais serem relativamente novas, principalmente se comparadas às de outras instalações (p. ex. radiativas e nucleares). Do total de 35 instalações minero-industriais não isentas, apenas três iniciaram o processo de autorização na fase de projeto, sendo solicitada elaboração de PMRA-PO.

No que concerne à distribuição geográfica das instalações não isentas, conforme é possível observar na Figura 9, nota-se uma maior presença na região sudeste, sendo 42,9% delas, seguida pelas regiões norte, que totaliza 28,6%, centro-oeste, com 17,1%, nordeste, com 8,6%, e região sul, com apenas 2,9%.

A concentração de atividade total é o critério utilizado para a isenção de instalações minero-industriais, desde que atendidos os critérios de dose; é também o único critério para a definição da categoria das instalações não isentas e, conseqüentemente, para determinação dos requisitos a serem cumpridos pelas empresas (CNEN, 2016). Nesse contexto, foram caracterizadas as instalações minero-industriais não isentas, com base nos dados de

classificação por categoria, conforme Norma CNEN-NN-4.01, e concentração de atividade total na amostra que baseou a classificação de cada instalação. Tais informações, referentes a 35 instalações, são apresentadas na Tabela 6.

Figura 9 – Distribuição geográfica das instalações minero-industriais não isentas



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 6 – Classificação e concentração de atividade total de instalações minero-industriais não isentas aos requisitos da Norma CNEN-NN-4.01

Categoria	Número de instalações	Concentração de atividade total (Bq/g)		
		Mínimo	Máximo	Média
Categoria I ($A > 500$ Bq/g)	10	567,40	50.930,00	8.199,00
Categoria II ($100 \leq A \leq 500$ Bq/g)	9	108,70	449,25	265,47
Categoria III ($10 < A < 100$ Bq/g)	16	15,70	87,00	35,54

Fonte: A autora, 2024.

Na categoria I, de instalações com maior concentração de atividade total, a média é de 8.199 Bq/g, com concentração mínima de 567,4 Bq/g e máxima de 50.930 Bq/g. As amostras das instalações da categoria II têm média de 265,47 Bq/g, com concentração mínima de 108,7 Bq/g e máxima de 449,25 Bq/g. As amostras que classificam instalações de categoria III têm concentração mínima de 15,7 Bq/g, máxima de 87 Bq/g e média de 35,54 Bq/g.

Quando analisamos o tipo de instalação (mina ou usina) em relação às categorias definidas na Norma CNEN-NN-4.01, percebe-se que nenhuma instalação do tipo mina está classificada na Categoria I; na Categoria II, o número de minas e usinas é igual, e na Categoria III predominam instalações de mineração (Figura 10).

Figura 10 – Instalações minero-industriais por tipo (mina; usina) e categoria



Fonte: A autora, 2024.

Naturalmente, a composição dos minérios varia e, portanto, alguns têm mais tendência de apresentar mais radionuclídeos que outros. Além disso, os processos de extração variam de acordo com os minérios. Nesse contexto, as caracterizações a seguir foram separadas por tipo de minério, tendo sido identificados: fosfato, estanho, terras raras, titânio, nióbio e carvão.

Das informações obtidas, optou-se por apresentar em tabela distinta os dados de concentração de atividade total e de concentrações de atividade dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 nos resíduos/rejeitos, visto que a caracterização desse material é importante para a avaliação dos impactos decorrentes da deposição, tanto inicial quanto final.

4.1.1 Fosfato

Das 35 instalações minero-industriais, 11 consistiam em instalações para produção de fosfato. Sobre o fosfato, o Brasil possui 2,29% da produção mundial, atendendo a 80% da demanda interna. Considerando a relevância e dependência econômica da importação para o

suprimento da demanda interna, o fosfato é classificado como um mineral estratégico para o país (BRASIL, 2021b).

A principal finalidade da extração de fosfato é atender ao setor de fertilizantes, com produção de ácido sulfúrico, ácido fosfórico, superfosfato simples e triplo, fosfato monoamônico (MAP) e fosfato bicálcico, que é majoritariamente utilizado em rações animais, além de outros derivados. Os municípios que mais produzem são Tapira e Araxá, em Minas Gerais, e Catalão e Ouvidor, em Goiás (ANM, 2024).

O processamento da rocha fosfática pode seguir duas direções principais: a maioria recebe tratamento ácido para a produção de ácido fosfórico, utilizado na fabricação de fertilizantes e outros produtos fosfatados; ou para transformação da rocha diretamente em fertilizante (IAEA, 2006; ICRP, 2019). O processo de ataque ácido leva a desafios de proteção radiológica, relacionados especialmente à produção de fosfogesso. De acordo com Mazzilli (2016), a produção de uma tonelada de ácido fosfórico resulta em 4-5 toneladas de fosfogesso.

A Tabela 7 apresenta os dados das 11 instalações minero-industriais para produção de fosfato que estão sob controle regulatório da CNEN, das quais três são minas e oito são usinas. Essas instalações são classificadas como categoria II ou III, apresentando concentração total de atividade máxima de 254,41 Bq/g. Das três minas, uma é classificada como categoria II, devido à concentração de atividade total no minério, e as demais, categoria III. Das oito usinas, duas são classificadas como categoria II, com as amostras de tecido filtrante e concentrado fosfático apresentando as maiores concentrações de atividade total. Seis usinas estão na categoria III, com as amostras de matérias-primas com a maior concentração de atividade total.

Tabela 7 – Caracterização das instalações minero-industriais de mineração e beneficiamento de fosfato quanto à categoria e concentração de atividade total (maior valor e amostra relacionada)

Instalação	Categoria	Concentração de atividade total (Bq/g)	Amostra com maior concentração de atividade
Usina	III	17,9	Rocha fosfática
Usina	III	24	Minério
Usina	III	48,9	Minério ROM
Mina	III	18,6	Titânio
Usina	II	240,4	Tecido filtrante
Usina	III	34,1	Minério ROM
Mina	III	15,7	Estéril
Usina	III	18,5	Rafinado
Usina	III	24,8	Rocha fosfática
Usina	II	254,41	Concentrado fosfático

Mina	II	108,7	Minério ROM
------	----	-------	-------------

Fonte: A autora, 2024.

De acordo com dados da literatura, a concentração de atividade total típica nos processos de produção de fosfato é de 0,03 Bq/g a 3 Bq/g de urânio na rocha fosfática; 0,015 Bq/g a 3 Bq/g de urânio no fosfogesso; 0,003 Bq/g a 4.000 Bq/g em incrustações da produção de ácido fosfórico; e de 0,4 Bq/g a 2 Bq/g de urânio nos fertilizantes fosfatados (IAEA, 2006; ICRP, 2019). Em análise sobre níveis de radioatividade em recursos minerais na China, os resultados máximos no estudo para a indústria de fosfato são de 2,73 Bq/g de urânio, 2,07 Bq/g de Ra-226, e 0,34 Bq/g de tório (LIU; PAN, 2012). Os resultados de análise das amostras das instalações mínero-industriais de fosfato apresentam valores semelhantes aos dos estudos citados.

Em relação à concentração de radionuclídeos em diferentes etapas de processo, verificou-se que a média da concentração de atividade total é de 12,15 Bq/g em amostras de matérias-primas e de 22,47 Bq/g nas de minério. Nos produtos, a concentração de atividade total média é de 15,05 Bq/g e a mediana é de 7,84 Bq/g. A tendência é de migração de radionuclídeos para o resíduo/rejeito, cujas amostras apresentaram mediana de 28,54 Bq/g.

Os resultados da análise da distribuição de radionuclídeos nos diferentes tipos de amostras do processo estão detalhados na Tabela 8 e representados na Figura 11.

Tabela 8 – Concentração de atividade de radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, de acordo com o tipo de amostra em instalações mínero-industriais de fosfato (n = 113)

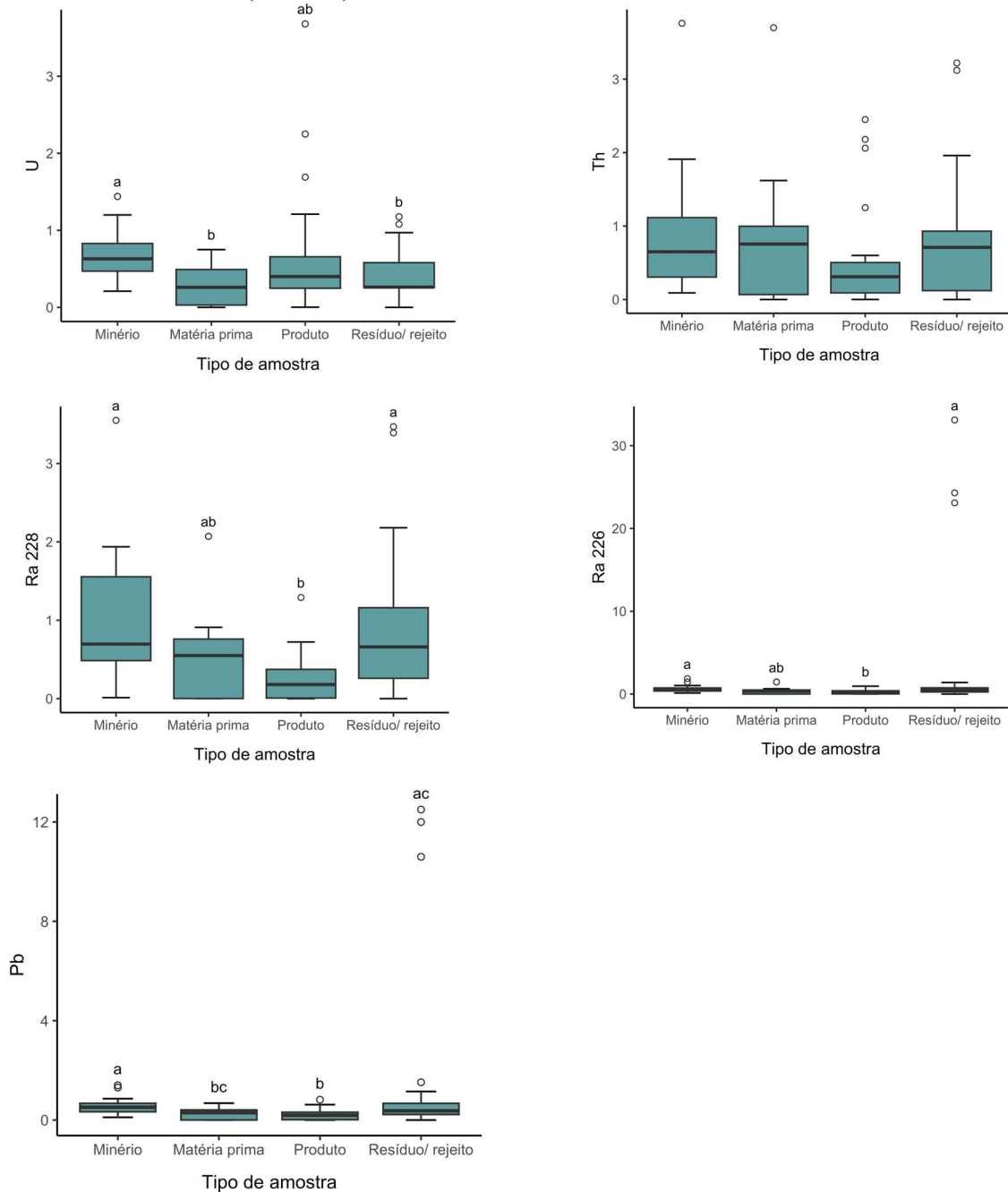
Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra			
		Minério (n = 24)	Matéria-prima (n = 12)	Produto (n = 36)	Resíduo/rejeito (n = 41)
U-238	Mediana (Q1; Q3)	0,63 (0,47; 0,83) a	0,26 (0,03; 0,49) b	0,40 (0,25; 0,66) ab	0,26 (0,26; 0,58) b
	Média (DP)	0,68 (0,34)	0,32 (0,29)	0,61 (0,70)	0,40 (0,31)
Th-232	Mediana (Q1; Q3)	0,65 (0,30; 1,12)	0,76 (0,07; 1,00)	0,31 (0,09; 0,50)	0,71 (0,12; 0,93)
	Média (DP)	0,85 (0,82)	0,89 (1,05)	0,47 (0,60)	0,74 (0,76)
Ra-226	Mediana (Q1; Q3)	0,57 (0,36; 0,74) a	0,34 (0,00; 0,49) ab	0,16 (0,01; 0,39) b	0,47 (0,25; 0,75) a
	Média (DP)	0,66 (0,43)	0,42 (0,53)	0,23 (0,25)	2,41 (7,06)
Ra-228	Mediana (Q1; Q3)	0,70 (0,49; 1,56) a	0,55 (0,00; 0,76) ab	0,18 (0,01; 0,37) b	0,66 (0,26; 1,16) a
	Média (DP)	0,98 (0,80)	0,63 (0,75)	0,24 (0,29)	0,85 (0,84)

Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra			
		Minério (n = 24)	Matéria-prima (n = 12)	Produto (n = 36)	Resíduo/rejeito (n = 41)
Pb-210	Mediana (Q1; Q3)	0,51 (0,33; 0,67) a	0,30 (0,00; 0,40) bc	0,19 (0,02; 0,31) b	0,37 (0,22; 0,67) ac
	Média (DP)	0,58 (0,35)	0,27 (0,27)	0,21 (0,21)	1,26 (3,00)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75). Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Fonte: A autora, 2024.

Figura 11 – Gráficos boxplot para concentração dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações minero-industriais de fosfato (n = 111)



Legenda: Teste de Kruskal-Wallis, seguido do post-hoc Dunn-Bonferroni. Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Fonte: A autora, 2024.

No geral, as amostras de resíduos e rejeitos são as que apresentam maiores teores de radionuclídeos, sendo que a concentração de atividade nessas amostras varia de acordo com a matéria-prima utilizada. A Tabela 9 mostra a concentração de atividade por radionuclídeo nas 42 amostras de resíduo/rejeito.

Tabela 9 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos/rejeitos de instalações minero-industriais de fosfato

Instalação	Amostra	Concentração de atividade					
		U-238	Th-232	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Total
Usina	Fosfogesso	0,05	0,11	0,50	0,54	0,42	9,50
	Efluente tratado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Usina	Estéril da mina	0,61	0,07	0,09	0,05	0,09	4,40
	Lamas	0,39	0,07	0,09	0,03	0,09	3,10
	Rejeito da flotação	0,54	0,07	0,11	0,03	0,11	4,00
	Rejeito da barragem	0,87	0,07	0,09	0,03	0,09	5,60
Usina	Lamas	0,72	0,93	0,64	1,45	0,67	23,00
	Rejeito da flotação convencional	1,18	0,96	0,48	1,13	0,37	21,00
	Rejeito da flotação ultrafinos	0,69	0,71	0,47	1,13	0,36	18,00
	Rejeito final barragem	0,42	0,95	0,57	1,43	0,59	21,00
	Expurgo	0,39	0,24	0,26	0,29	0,22	7,00
	Água barragem	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Água bacia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Usina	Estéril	0,58	1,77	0,73	1,81	0,83	27,90
	Lama natural	0,97	3,22	1,09	3,39	1,15	48,60
	Lama gerada	0,80	1,96	0,81	2,14	0,75	32,30
	Rejeito flotação de finos naturais	0,92	3,12	1,14	3,47	0,96	48,70
	Rejeito flotação de finos	0,68	1,96	0,75	2,18	0,64	31,40
	Rejeito flotação de grossos	0,55	1,30	0,68	1,41	0,50	22,30
Mina	Estéril - frente 2	0,16	0,91	0,22	1,16	0,23	14,10
	Estéril - frente 5	0,16	0,26	0,13	0,22	0,14	4,20
Usina	Rejeito magnético	0,26	0,90	0,16	0,23	0,14	5,10
	Lama granulado	0,26	0,75	0,38	0,66	0,39	11,40
	Rejeito de flotação granulado	0,26	0,71	0,36	0,57	0,34	10,30
	Lama natural	0,26	0,78	0,26	0,71	0,28	10,90
	Rejeito magnético	0,26	0,14	0,10	0,12	0,10	3,40
	Lama friável	0,26	0,80	0,33	0,69	0,33	11,30
	Rejeito de flotação friável	0,26	0,72	0,31	0,62	0,31	10,40
	Lama ultrafinos	0,26	0,78	0,34	0,74	0,37	11,90
	Rejeito de flotação ultrafinos	0,26	0,72	0,38	0,68	0,34	11,50
Usina	Fosfogesso pilha	0,26	0,09	0,98	0,33	0,45	11,61
	Sólidos produzidos na ETEL	0,40	0,09	0,06	0,01	0,05	2,63
	Tecido filtrante	0,26	0,09	24,30	0,03	10,60	181,70
	Tecido filtrante	0,26	0,09	23,10	0,23	12,00	178,10
	Tecido filtrante	0,26	0,09	33,10	0,34	12,50	240,40
Usina	Rejeito da deslamagem	1,08	1,26	1,39	1,79	1,12	32,40
	Rejeito magnético	0,72	0,67	0,53	0,64	0,56	14,60
	Rejeito da flotação	0,74	0,46	0,57	1,06	1,52	24,80
	Fosfogesso	0,48	0,26	1,04	1,19	0,35	15,20

Mina	Estéril	0,46	0,93	0,56	0,86	0,46	15,70
Usina	Fosfogesso	0,04	0,17	1,12	0,26	0,96	12,30
	Água de processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

Fonte: A autora, 2024.

A partir dos dados da Tabela 9, é possível verificar que, com exceção de uma instalação em que o tecido filtrante é o rejeito com maior atividade, as maiores concentrações nas amostras de resíduo/rejeito nas indústrias de fosfato são em lamas e rejeito de flotação.

As amostras de fosfogesso apresentam concentração de atividade total entre 9,5 Bq/g e 15,2 Bq/g, e os radionuclídeos com maior concentração são Ra-226 e Ra-228. A migração de radionuclídeos para o fosfogesso é esperada. Mazzilli (2016) estima que o percentual de atividade presente no minério seja de cerca de 10% de U-238; 80% de Th-232; 90% de Ra-226; e 100% de Pb-210 no fosfogesso.

A caracterização de resíduos/rejeitos é imprescindível, não apenas para a deposição e manejo de pilhas de fosfogesso, mas também para a reutilização dos resíduos. No Brasil, é permitida a utilização de fosfogesso na agricultura e na indústria cimenteira desde que atendido o limite de dispensa de 1,0 Bq/g de Ra-226 ou de Ra-228 para cada radionuclídeo (CNEN, 2014).

4.1.2 Estanho

Foram identificadas 11 instalações minero-industriais da indústria de estanho, outro mineral considerado estratégico pelo Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos devido à sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia (BRASIL, 2021a).

Segundo a ANM, o Brasil possui cerca de 9% das reservas mundiais de estanho contido, sendo responsável pela sexta maior produção mundial, com 6,1% da produção total (17.081 toneladas) (ANM, 2024). A cassiterita é a fonte primordial de estanho na atualidade, destacando-se como o mineral que possui a maior concentração desse metal (LIMA, 2019).

A obtenção do estanho a partir da cassiterita é realizada por meio de um processo de redução, no qual tanto o carvão vegetal quanto o mineral são utilizados como agentes redutores. Esse processo é conduzido em fornos a temperaturas que oscilam entre 1.100 °C e 1.300 °C. O uso de altas temperaturas nos processos de fusão e refino da cassiterita pode resultar em níveis mais altos de Pb-210 e/ou Po-210 nos sistemas de filtragem e abatimento

de poeira. A escória de estanho é rica em radionuclídeos das cadeias de decaimento do urânio e do tório e é, por vezes, aproveitada como fonte de nióbio e tântalo (LIMA, 2019).

Conforme informações da ANM (2023), há no Brasil 26 instalações para lavra ou processamento de minério de estanho, sendo 17 minas e nove usinas de beneficiamento. Dessas, apenas 11 estão sob o controle regulatório da CNEN. Tais instalações estão localizadas nos estados de Rondônia, Amazonas, Minas Gerais e São Paulo. No Anuário Mineral Brasileiro de 2022 das principais substâncias metálicas, Amazonas, Rondônia, Pará, Mato Grosso e Minas Gerais são, nessa ordem, os maiores responsáveis pela produção comercializada de estanho (ANM, 2023).

Das 11 instalações consideradas neste trabalho, são três minas e oito usinas. As três minas são classificadas como Categoria III, e a amostra com maior concentração de atividade total é o concentrado mineral. Nas usinas, as amostras de resíduo/rejeito são as que apresentam maiores concentrações de atividade, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Categoria e concentração de atividade total (valor e amostra relacionada) em instalações minero-industriais de estanho

Instalação	Categoria	Concentração de atividade total (Bq/g)	Amostra com maior concentração de atividade
Mina	III	38,00	Concentrado mineral
Usina	I	2813,00	Liga Sn/Pb
Usina	I	567,4	Escória
Usina	II	315,00	Escória
Mina	III	37,90	Concentrado mineral
Usina	III	66,80	Concentrado mineral
Usina	I	7578,00	Chumbo metálico
Mina	III	67,00	Minério
Usina	I	1274,00	Escória
Usina	I	2259,00	Liga Sn/Pb
Usina	II	284,20	Escória

Fonte: A autora, 2024.

O Safety Series nº 49 da AIEA aponta que, nas escórias de metalurgia do estanho, o tório é o radionuclídeo com maior concentração, apresentando variação típica de 0,07 Bq/g a 15 Bq/g; contudo, nas amostras de pó dos sistemas de filtragem, os radionuclídeos Pb-210 e Po-210 apresentam concentrações de até 200 Bq/g (IAEA, 2006). Nas amostras de pó de filtragem deste estudo, o Pb-210 também é o radionuclídeo com maior concentração, com uma média de 7,4 Bq/g. A Tabela 11 apresenta resultados de análises radiométricas dos rejeitos e resíduos da produção de estanho.

Como em outras produções minerais, as características dos resíduos e rejeitos dependem dos aspectos geológicos e geoquímicos dos depósitos dos quais o minério é extraído, bem como do processo metalúrgico. Nas instalações de mineração, as amostras com maiores concentrações de atividades foram as de concentrado mineral; os resíduos e rejeitos contêm concentrações baixas de radionuclídeos (3,0 Bq/g e 3,1 Bq/g) e não há diferença significativa da concentração de atividade dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210.

No processo metalúrgico (usina), contudo, os resíduos e rejeitos têm concentrações mais altas. Amostras de escória metalúrgica e de chumbo apresentaram concentrações entre 1.274 Bq/g e 7.578 Bq/g, respectivamente. Outras amostras importantes são as de sólidos do lavador de gases, com concentrações que variam de 13,60 Bq/g a 105,96 Bq/g. Os resultados da análise da distribuição de radionuclídeos em diferentes tipos de amostras estão detalhados na Tabela 12 e representados na Figura 12.

Tabela 11 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos/rejeitos de instalações mineiro-industriais de estanho

Instalação	Amostra	Concentração de atividade					
		U-238	Th-232	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Total
Mina	Rejeito mina	0,31	0,10	0,07	0,08	0,07	3,00
Usina	Escória 1	2,40	2,83	1,77	2,74	0,21	51,00
	Escória 2	2,53	3,52	1,82	3,11	0,04	55,00
	Pó do filtro grosso	1,67	1,83	1,15	1,38	2,12	36,00
	Pó do filtro fino	0,31	0,18	0,09	0,10	17,60	56,00
Usina	Escória de primeira	9,50	36,00	13,30	44,30	1,80	567,40
	Escória de segunda	11,60	27,00	14,10	29,70	0,50	438,40
Usina	Escória	11,06	15,96	7,76	21,77	0,41	314,96
	Pó do filtro	0,58	0,59	2,71	6,64	8,81	105,96
Mina	Rejeito mina	0,21	0,18	0,12	0,09	0,11	3,10
Usina	Chumbo	0,11	0,04	2,00	0,07	2.521,47	7.578,00
	Fração magnética	3,04	12,49	2,43	5,79	2,01	100,00
	Escória final	70,18	71,64	25,82	67,33	9,25	1.211,00
Usina	Escória final a	17,10	33,10	13,30	25,70	0,190	430,00
	Escória final b	47,00	87,00	36,50	81,20	0,50	1.274,00
Usina	Escória de 3ª	6,03	11,71	7,12	15,33	0,09	355,00
	Pó do lavador de gases	0,26	0,09	0,72	0,50	1,14	13,60
	Liga Sn-Pb	1,04	0,09	0,23	0,01	751,77	2.259,00
	Fração magnética	3,29	1,31	3,44	1,92	0,30	59,00
Usina	Escória de 3ª	13,40	12,80	12,50	14,00	0,98	284,20

*Pode ter menos instalações que o total por não terem sido identificadas ou registradas amostras de resíduos/rejeitos.

Fonte: A autora, 2024.

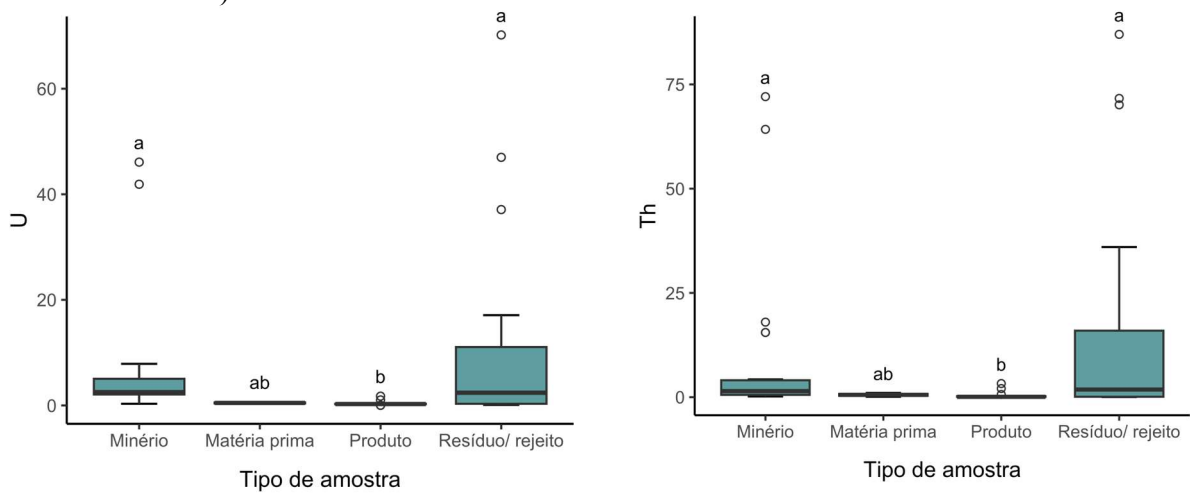
Tabela 12 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para instalações minero-industriais do estanho (n = 61)

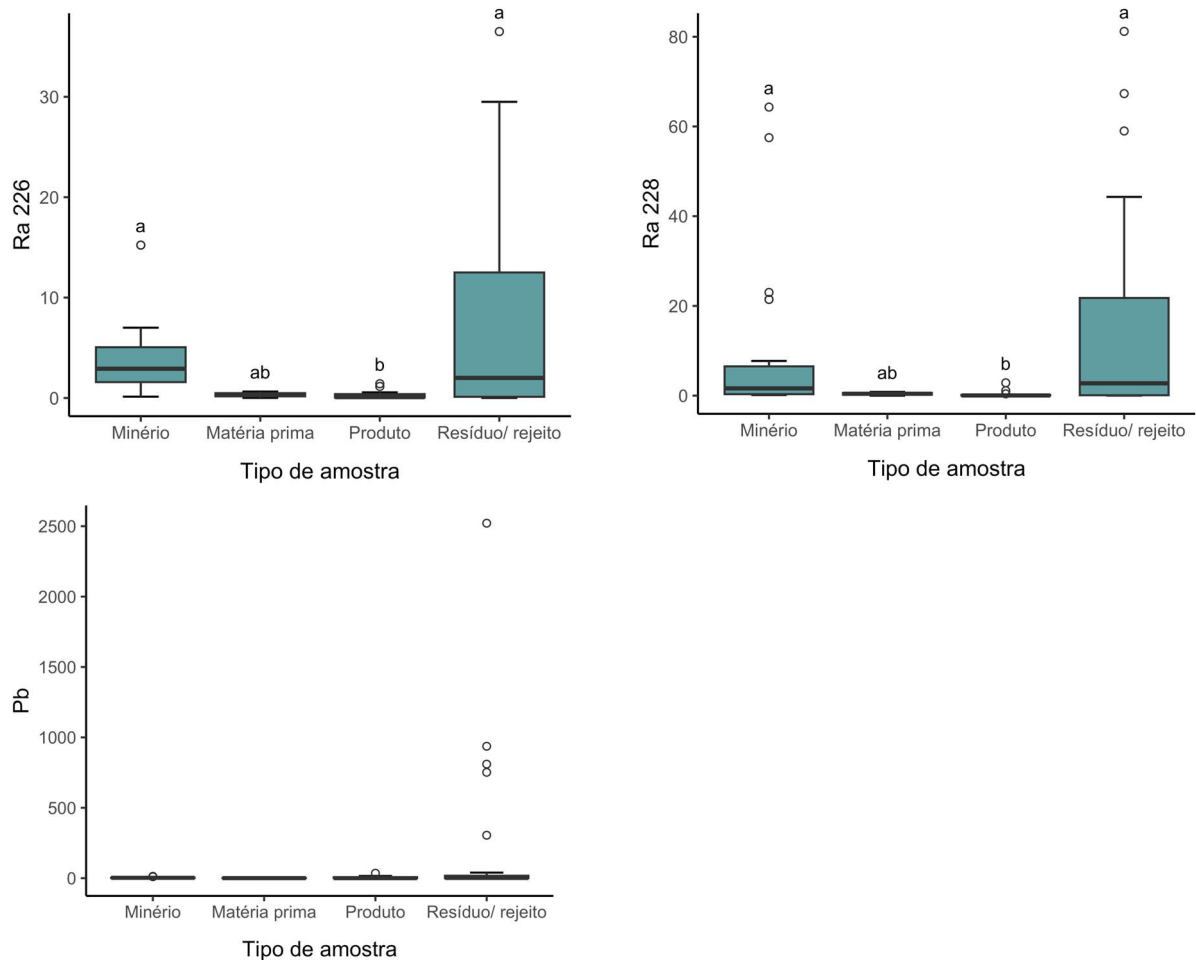
Radionuclídeo	Variável	Tipo de amostra			
		Minério (n = 22)	Matéria-prima (n = 2)	Produto (n = 12)	Resíduo/rejeito (n = 25)
U	Mediana (Q1; Q3)	2,52 (2,08; 5,04) a	0,47 (0,39; 0,55) ab	0,26 (0,22; 0,32) b	2,40 (0,31; 11,06) a
	Média (DP)	6,61 (12,27)	0,47 (0,23)	0,41 (0,50)	9,60 (17,20)
Th	Mediana (Q1; Q3)	1,46 (0,55; 4,06) a	0,56 (0,33; 0,79) ab	0,09 (0,08; 0,24) b	1,83 (0,10; 15,96) a
	Média (DP)	9,51 (19,75)	0,56 (0,65)	0,55 (1,04)	15,56 (25,35)
Ra-226	Mediana (Q1; Q3)	2,91 (1,58; 5,06) a	0,32 (0,17; 0,48) ab	0,09 (0,04; 0,39) b	2,00 (0,12; 12,50) a
	Média (DP)	4,02 (4,11)	0,32 (0,45)	0,33 (0,48)	7,06 (10,16)
Ra-228	Mediana (Q1; Q3)	1,62 (0,32; 6,52) a	0,41 (0,21; 0,62) ab	0,03 (0,02; 0,14) b	2,74 (0,08; 21,77) a
	Média (DP)	9,77 (18,12)	0,41 (0,58)	0,38 (0,84)	15,23 (23,56)
Pb-210	Mediana (Q1; Q3)	2,54 (0,89; 3,64)	0,41 (0,25; 0,56)	0,24 (0,10; 0,67)	1,80 (0,30; 17,60)
	Média (DP)	3,04 (3,24)	0,41 (0,44)	5,96 (10,91)	216,78 (554,43)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75). Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$)

Fonte: A autora, 2024.

Figura 12 – Gráfico boxplot para concentração de atividade dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações de estanho (n = 61)





Legenda: Teste de Kruskal-Wallis, seguido do post-hoc Dunn-Bonferroni. Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Fonte: A autora, 2024.

4.1.3 Nióbio

O nióbio, assim como o fosfato e o estanho, é considerado um mineral estratégico para o Brasil, tanto pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia quanto pelo fato de o Brasil ter vantagens comparativas, sendo o maior produtor mundial, com cerca de 93% da produção em 2016 (80.670 toneladas), e o detentor das maiores reservas mundiais conhecidas (16.165.878 toneladas de nióbio contido) (ANM, 2019).

O piroclore e a tantalita/columbita são importantes fontes de nióbio. Os processos mais importantes para a produção de nióbio são as reduções carbotérmicas e silicotérmicas e metalotérmicas (que empregam alumínio, cálcio ou magnésio). Dessas, a redução aluminotérmica é a mais utilizada por ser um processo extremamente exotérmico e pela facilidade de separação do óxido gerado que possui menor ponto de fusão (FELICIANO, 2016).

Dados de literatura mostram que o pirocloro geralmente contém tório com concentração de atividade de cerca de 100 Bq/g no concentrado e na escória (PENFOLD *et al.*, 1999). Em amostras de pó dos sistemas de filtragem, os radionuclídeos Pb-210 e Po-210 prevalecem com concentrações variando de 100 Bq/g a 500 Bq/g. O processamento de columbita e tantalita para a extração de nióbio e tântalo leva a concentrações significativas de U-238 (~300 Bq/g), Th-232 (~100 Bq/g) e Ra-226 (~500 Bq/g) nos resíduos/rejeitos (IAEA, 2006). Dados de estudo realizado em instalações na China apresentam concentrações de 21,5 Bq/g de urânio; 9,2 Bq/g de tório; e 57,48 Bq/g de Ra-226 (LIU; PAN, 2012).

Os estados produtores de nióbio são Minas Gerais, Goiás, Amazonas, Rondônia e Pará. São três lavras de grande porte a céu aberto, excluídas desse registro as permissões de lavra garimpeira, e cinco usinas (ANM, 2023). Na CNEN são cadastradas oito instalações que produzem nióbio, localizadas nos estados de Minas Gerais, Goiás e Amazonas, sendo três minas e cinco usinas.

As minas têm uma concentração de atividade máxima que varia de 31 Bq/g a 319 Bq/g e estimativas de dose que não ultrapassam 6 mSv/ano. As usinas são todas Categoria I, com doses anuais estimadas em até 20,76 mSv, e com concentração de atividade da amostra pela qual a instalação foi classificada variando de 736,59 Bq/g a 7.718,00 Bq/g, conforme Tabela 13.

A maioria das amostras com as maiores concentrações, ou seja, amostras que levam à classificação, são de usinas. As amostras de minas apresentam concentrações mais baixas, em geral, indicando que a quebra de equilíbrio e a migração de radionuclídeos para resíduos é mais acentuada em processos metalúrgicos. Nos resíduos, a concentração de atividade total média é de 1.456,97 Bq/g; nos produtos finais, 45,38 Bq/g; e no minério, 1.158,46 Bq/g.

Tabela 13 – Categoria, concentração de atividade e amostra relacionada em instalações de mineração e beneficiamento de nióbio

Instalação	Categoria	Concentração de atividade total (Bq/g)	Amostra com maior concentração de atividade
Usina	I	746,59	Escória
Mina	II	319,30	Minério
Mina	III	87,00	Estéril da mina
Usina	I	931,00	Filtros de manga
Usina	I	7173,00	Sólidos do lavador de gases
Usina	I	5172,00	Sólidos do lavador de gases
Mina	III	31,00	Minério
Usina	I	7718,00	Escória

Fonte: A autora, 2024.

A distribuição de U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 nos diferentes tipos de amostra é apresentada na Tabela 14 e representada na Figura 13, na qual letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si. Para o nióbio, as concentrações de atividade de U, Ra-226 e Ra-228 variaram de acordo com o tipo de amostra.

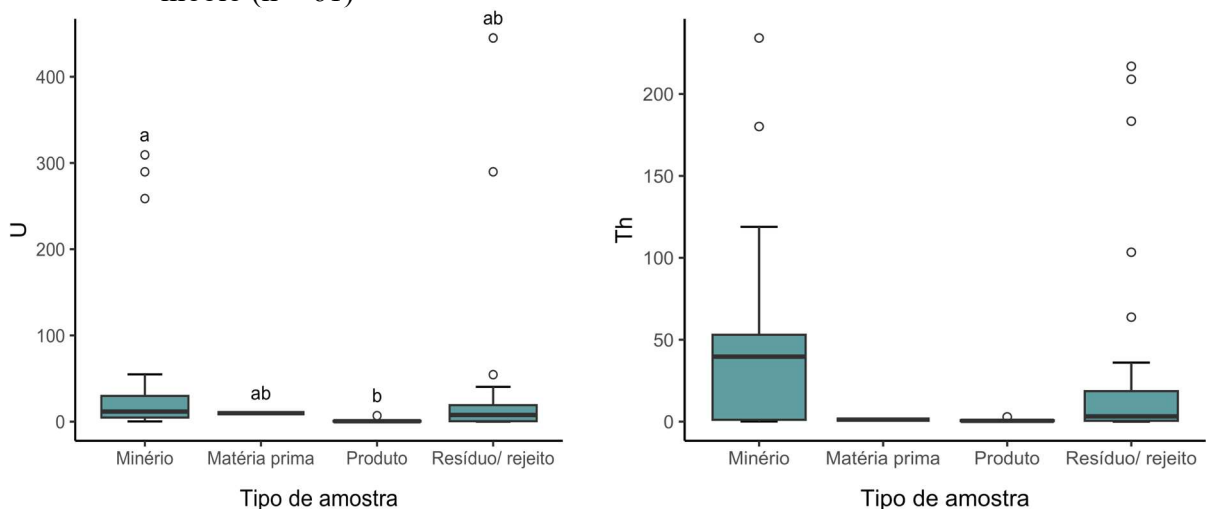
Tabela 14 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para as instalações minero-industriais de nióbio (n = 64)

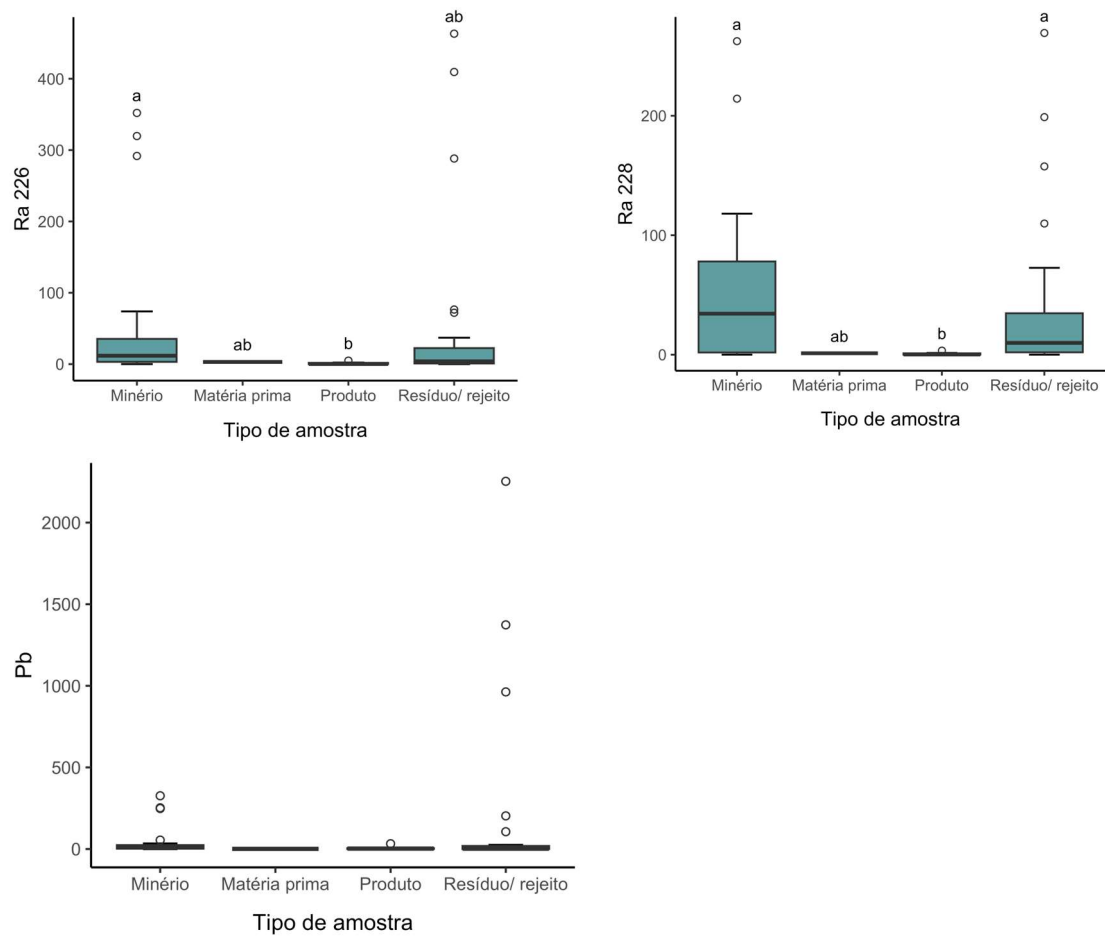
Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra			
		Minério (n = 24)	Matéria-prima (n = 1)	Produto (n = 6)	Resíduo/rejeito (n = 33)
U	Mediana (Q1; Q3)	11,69 (4,77; 29,85) a	9,82 (9,82; 9,82) ab	0,49 (0,15; 0,96) b	7,73 (0,55; 19,14) ab
	Média (DP)	50,57 (96,95)	9,82 (NA)	1,53 (2,67)	45,77 (116,47)
Th	Mediana (Q1; Q3)	39,67 (1,11; 53,03)	1,20 (1,20; 1,20)	0,49 (0,33; 0,88)	3,22 (0,49; 18,62)
	Média (DP)	47,50 (63,43)	1,20 (NA)	0,91 (1,00)	29,81 (60,75)
Ra-226	Mediana (Q1; Q3)	11,74 (3,17; 35,35) a	3,01 (3,01; 3,01) ab	0,16 (0,03; 1,74) b	3,88 (0,88; 22,42) ab
	Média (DP)	57,53 (109,10)	3,01 (NA)	1,24 (1,97)	47,15 (114,95)
Ra-228	Mediana (Q1; Q3)	34,30 (1,84; 78,04) a	1,18 (1,18; 1,18) ab	0,13 (0,06; 1,13) b	9,85 (1,97; 34,69) a
	Média (DP)	52,77 (71,59)	1,18 (NA)	0,86 (1,37)	37,34 (63,05)
Pb-210	Mediana (Q1; Q3)	9,90 (2,83; 23,28)	0,82 (0,82; 0,82)	2,30 (0,73; 4,28)	1,85 (0,53; 18,06)
	Média (DP)	47,73 (94,52)	0,82 (NA)	7,08 (12,49)	158,13 (480,06)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75). Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Fonte: A autora, 2024.

Figura 13 – Gráficos boxplot para concentração de atividade dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210, por tipo de amostras, em instalações minero-industriais de nióbio (n = 61)





Legenda: Gráfico boxplot para Pb de acordo com Tipo de amostra, para Nióbio. Teste de Kruskal-Wallis, seguido do post-hoc Dunn-Bonferroni. Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Fonte: A autora, 2024.

Na Tabela 15 estão detalhadas as concentrações de atividade por radionuclídeo das subséries do urânio e do tório para cada amostra classificada como resíduo/rejeito.

Tabela 15 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações mínero-industriais de nióbio

Instalação	Amostra	Concentração de atividade					
		U	Th	Ra-226	Ra-228	Pb	Total
Usina	Borra da digestão de liga Fe/Ta/Nb	12,29	4,52	8,46	4,96	4,72	175,53
	Borra da digestão de columbita	11,26	4,29	37,00	11,26	13,50	424,43
	Borra da ETE	0,22	0,01	0,05	0,01	0,05	1,61
	Escória	54,50	2,38	72,00	2,93	4,72	747,59
Mina	Rejeito da pré-concentração	0,26	0,09	0,02	0,01	0,02	1,62
Mina	Estéril	6,59	0,83	0,99	7,62	0,74	87,39
Usina	Rejeito de magnetita	0,81	0,32	0,15	0,79	0,14	11,00
	Lamas	9,01	1,31	1,71	8,44	1,99	108,00
	Rejeito da flotação	3,43	0,90	1,05	4,32	0,93	56,00
	Finos do filtro manga com Pb	24,60	3,75	1,90	29,60	203,10	931,00
	Escória	9,01	12,40	4,70	72,70	1,10	838,00

Mina	Rejeito do escalpe	0,15	0,21	0,06	0,81	0,06	8,79
	Rejeito do beneficiamento - barragem	0,04	0,49	0,18	2,14	0,12	21,38
Usina	Moagem - Rejeito	0,07	0,34	0,25	1,46	0,21	15,95
	Beneficiamento- tailings	0,39	0,29	1,73	1,19	1,14	26,73
	Rejeito de nióbio (barragem de rejeitos)	0,60	0,48	3,05	2,17	1,68	46,36
	Escória da fusão aluminotérmica	11,74	17,55	11,22	26,43	0,01	382,39
	Escória	12,45	18,52	8,77	16,19	1,01	282,18
	Sólido do lavador de gases da fusão aluminotérmica	-	-	-	-	-	5173,00
	Rejeito final	1,55	1,44	1,73	1,20	1,71	36,00
Usina	Rejeito da planta de mistos	18,63	63,77	20,98	64,81	16,61	916,00
	Rejeito da flotação de estanho	20,70	36,03	26,76	34,12	15,45	653,00
	Rejeito da PC de niobatos	7,97	12,61	8,99	13,89	7,40	254,00
	Rejeito da flotação de niobatos	27,94	103,40	36,47	109,78	22,44	1517,00
	Escória	444,95	216,89	463,16	269,30	24,54	7718,00
	Escória	444,95	208,96	409,46	198,88	15,88	6728,00
	Escória final	289,74	183,38	288,17	157,60	25,01	4855,00
	Pó de chumbo	40,36	32,43	76,50	54,67	962,57	4073,00
Usina	Rejeito do escalpe	0,26	0,84	0,17	1,00	0,21	13,00
	Sólidos do lavador de gases	0,96	2,70	13,20	36,40	2253,00	7173,00
	Incrustação do lavador de gases	1,70	3,80	2,70	7,00	106,00	409,00
	Escória de alimentação	7,50	18,90	6,60	19,20	0,64	271,00

Fonte: A autora, 2024.

Nas instalações de mineração, a amostra com maior concentração total é a amostra de estéril (87,39 Bq/g). Na metalurgia, as concentrações são mais elevadas, notadamente nas amostras de escória (271 Bq/g a 7.718 Bq/g) e nas de sólidos de sistemas de filtragem de gases (409 Bq/g a 7.173 Bq/g).

4.1.4 Carvão

O carvão mineral, uma rocha sedimentar, surge a partir da fossilização de componentes orgânicos ao longo de milênios, formando uma mistura complexa e diversificada. Seus diversos usos são determinados pelo seu conteúdo de carbono e incluem a produção de energia termoeleétrica, aplicações metalúrgicas e o tratamento de água (COSMO *et al.*, 2020). De acordo com dados de 2017 da ANM, o Brasil é responsável por cerca de 0,1% da produção mundial, sendo dependente da importação de carvão mineral, e a produção concentra-se nos três estados da região Sul do país, sendo 65% no Rio Grande do Sul, 37% em Santa Catarina e 1,3% no Paraná (ANM, 2019).

A preparação do carvão mineral geralmente passa pelas etapas de cominuição, para redução do tamanho das partículas; classificação, com a finalidade de separar partículas de

tamanhos diferentes; lavagem, em que se utiliza água ou soluções químicas em processos como flotação, separação por densidade e outros métodos, para remover impurezas, como areia, argila, enxofre e materiais rochosos; e, em alguns casos, tratamento térmico, como a coqueificação ou a carbonização, para aumentar o seu valor calorífico (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2010). Há registro de apenas uma instalação de mineração de carvão nos processos analisados (Tabela 16).

Na instalação de mineração de carvão registrada, foram 9 amostras no total, sendo relativas a minério, produto e resíduos/rejeitos. A concentração de atividade não varia significativamente entre o tipo de amostras, tendo uma média de 17 Bq/g no minério, 16 Bq/g no produto e 10,26 Bq/g nos resíduos/rejeitos. A Tabela 17 e a Figura 14 mostram a distribuição dos radionuclídeos nos diferentes tipos de amostras

Tabela 16 – Categoria, concentração de atividade e amostra relacionada em instalações de mineração de carvão

Instalação	Categoria	Concentração de atividade total (Bq/g)	Amostra com maior concentração de atividade
Mina	III	17,00	Rejeito e carvão grosso

Fonte: A autora, 2024.

A maior parte do carvão contém urânio, tório e seus produtos de decaimento, contudo, as concentrações de atividade, a depender da origem geológica, não são elevadas (ICRP, 2019). A maior preocupação, em termos de proteção radiológica, é com as cinzas resultantes da combustão do carvão para produção de calor e eletricidade (MATTA, 2016). Radionuclídeos voláteis, como Pb-210 e Po-210, se acumulam nas cinzas volantes e nas superfícies internas das caldeiras, onde as amostras registram concentrações de atividade superiores a 100 Bq/g de Pb-210 (IAEA, 2006).

Para carvão, as concentrações de atividade de radionuclídeos não variaram de acordo com o tipo de amostra, e os radionuclídeos preponderantes em todos os tipos de amostra são U-238, Ra-226 e Pb-210. A pequena variação de atividade entre minério, produto e resíduos/rejeitos indica não haver quebra do equilíbrio, o que é esperado para uma instalação de mineração.

A concentração de atividade nas amostras de rejeitos varia de 0,05 Bq/g a 17 Bq/g, conforme Tabela 18. Ressalta-se, entretanto, que são amostras de uma única instalação.

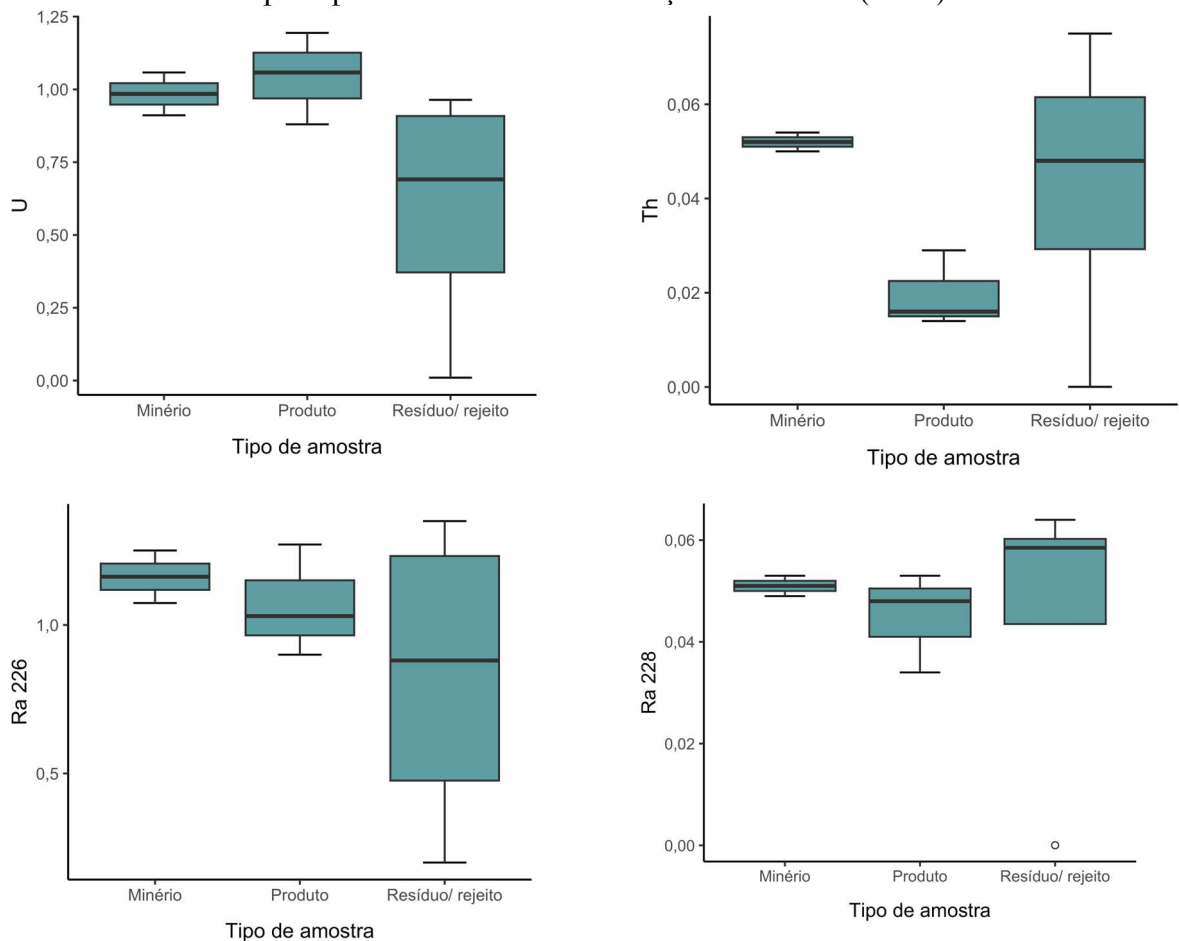
Tabela 17 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para o minério Carvão (n = 9)

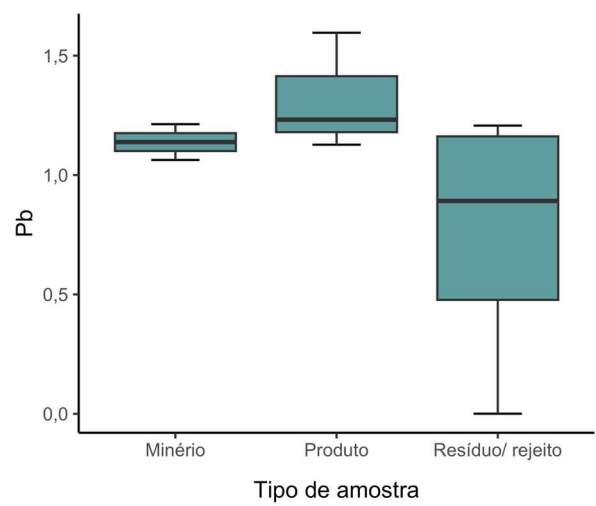
Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra		
		Minério (n = 2)	Produto (n = 3)	Resíduo/rejeito (n = 4)
U	Mediana (Q1; Q3)	0,98 (0,95; 1,02)	1,06 (0,97; 1,13)	0,69 (0,37; 0,91)
	Média (DP)	0,98 (0,10)	1,04 (0,16)	0,59 (0,44)
Th	Mediana (Q1; Q3)	0,05 (0,05; 0,05)	0,02 (0,02; 0,02)	0,05 (0,03; 0,06)
	Média (DP)	0,05 (0,00)	0,02 (0,01)	0,04 (0,03)
Ra-226	Mediana (Q1; Q3)	1,16 (1,12; 1,21)	1,03 (0,96; 1,15)	0,88 (0,48; 1,23)
	Média (DP)	1,16 (0,13)	1,07 (0,19)	0,83 (0,54)
Ra-228	Mediana (Q1; Q3)	0,05 (0,05; 0,05)	0,05 (0,04; 0,05)	0,06 (0,04; 0,06)
	Média (DP)	0,05 (0,00)	0,04 (0,01)	0,05 (0,03)
Pb-210	Mediana (Q1; Q3)	1,14 (1,10; 1,18)	1,23 (1,18; 1,41)	0,89 (0,48; 1,16)
	Média (DP)	1,14 (0,11)	1,32 (0,25)	0,75 (0,56)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75).

Fonte: A autora, 2024.

Figura 14 – Gráficos boxplot para concentração dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações de carvão (n = 9)





Legenda: Teste de Kruskal-Wallis
Fonte: A autora, 2024.

Tabela 18 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações de mineração e beneficiamento de carvão

Instalação	Amostra	Concentração de atividade					
		U	Th	Ra-226	Ra-228	Pb	Total
Mina	Resíduo da catação	0,49	0,06	0,57	0,06	0,64	8,00
	Rejeito do jigüe	0,89	0,04	1,19	0,06	1,15	16,00
	Rejeito de finos	0,96	0,08	1,35	0,06	1,21	17,00
	Reciclo de água	0,01	0,00	0,20	0,00	0,00	0,05

Fonte: A autora, 2024.

4.1.5 Titânio

O titânio e as terras raras são considerados minerais estratégicos pelo uso em produtos de alta tecnologia (BRASIL, 2021a). Em 2016, o Brasil foi o maior produtor da América Latina, com 1% da produção mundial. De acordo com ANM (2019), os dois municípios produtores de concentrado de titânio são Mataraca (PB) e São Francisco de Itabapoana (RJ); no país apenas duas empresas beneficiaram titânio.

O titânio é um mineral com alta resistência à corrosão, elevada resistência mecânica e baixa densidade, o que o torna indispensável em diversas aplicações industriais e tecnológicas. Sua utilização abrange desde a fabricação de componentes aeroespaciais, onde a proporção entre resistência e peso é crucial, até implantes médicos e próteses, aproveitando sua notável biocompatibilidade. Além disso, o dióxido de titânio é amplamente empregado como pigmento em tintas, revestimentos, plásticos e papel, devido à sua capacidade de conferir brancura, cobertura e resistência aos produtos (LUZ; LINS, 2008).

Sob controle regulatório da CNEN, foram identificadas duas instalações para produção de titânio, sendo uma mina e uma usina. A mineração, de produção de ilmenita, apresenta concentração total de atividade de 449,25 Bq/g na amostra de rejeito. A instalação de produção de dióxido de titânio (usina) é classificada como Categoria I devido às concentrações dos radionuclídeos Ra-226, Ra-226 e Pb-210 nas amostras de tecido filtrante, conforme Tabela 19.

Tabela 19 – Categoria, concentração de atividade total e amostra relacionada em instalações minero-industriais de titânio

Instalação	Categoria	Concentração de atividade total (Bq/g)	Amostra com maior concentração de atividade
Usina	I	50930,00	Tecido filtrante
Mina	II	449,25	Rejeito

Fonte: A autora, 2024.

A distribuição de radionuclídeos nas amostras de matéria-prima tem média de 4,4 Bq/g, com valores mínimo e máximo de 2,6 Bq/g e 6,2 Bq/g. Nas amostras de minério, a concentração de atividade total varia de 3,94 Bq/g a 75,28 Bq/g, com média de 36,02 Bq/g. A única amostra de produto registrada possui concentração de atividade de 2,2 Bq/g. Para titânio, as concentrações de atividade de radionuclídeos não variaram de acordo com o tipo de amostra. Esses resultados estão detalhados na Tabela 20 e representados na Figura 15. A Tabela 21 detalha a concentração dos radionuclídeos U-238, Th-232, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 nas amostras de resíduos/rejeitos.

Na produção de dióxido de titânio, nota-se a maior concentração dos isótopos de rádio nas amostras de tecido filtrante (312,12 Bq/g a 1909,74 Bq/g de Ra-226 e 855,31 Bq/g a 4.887,23 Bq/g de Ra-228). Nos rejeitos da mineração, a concentração dos radionuclídeos analisados é menos heterogênea em amostras individuais, variando, contudo, entre diferentes amostras.

Tabela 20 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para as instalações minero-industriais de titânio (n = 28)

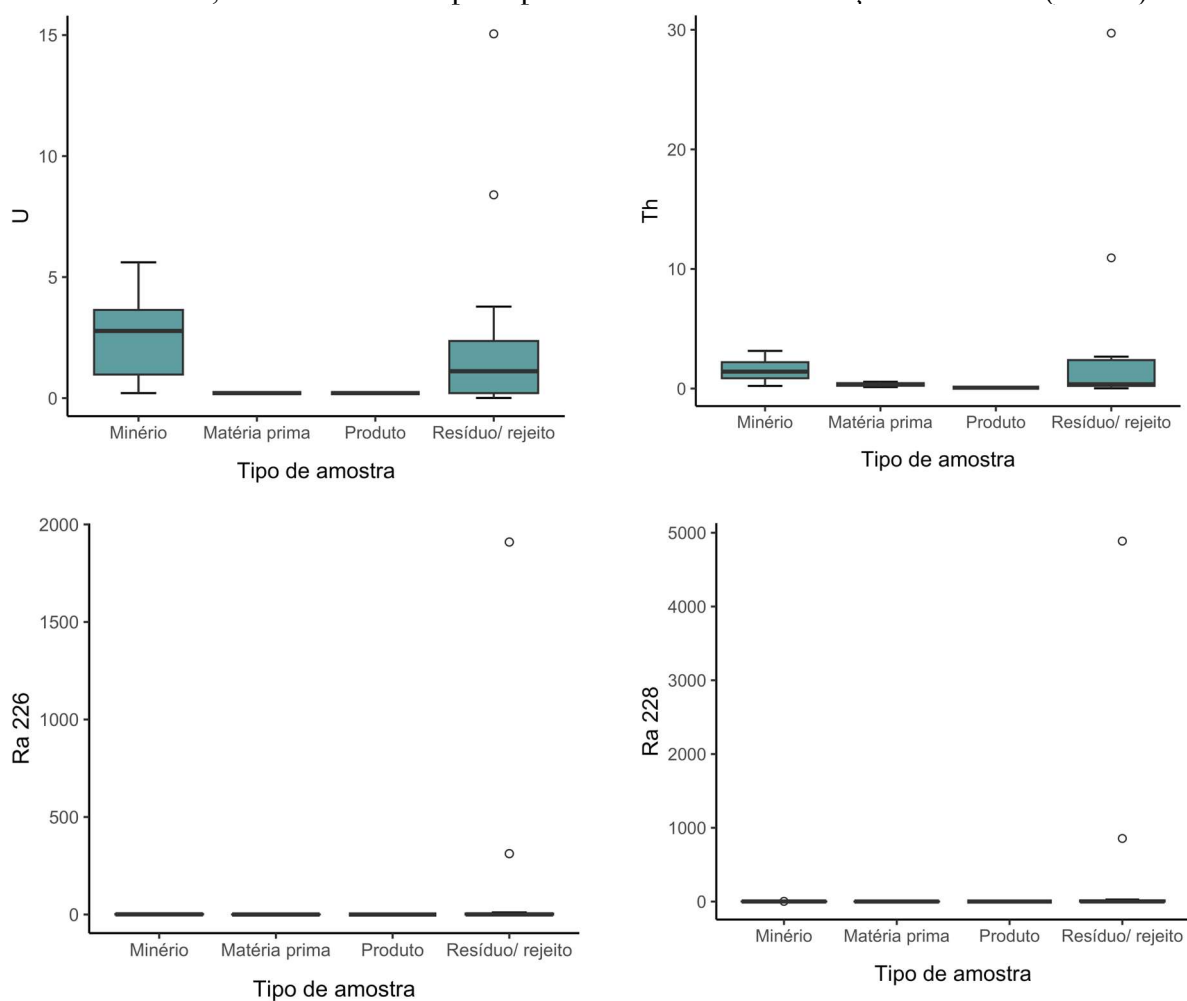
Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra			
		Minério (n = 12)	Matéria-prima (n = 2)	Produto (n = 1)	Resíduo/rejeito (n = 13)
U	Mediana (Q1; Q3)	2,78 (0,98; 3,64)	0,21 (0,21; 0,21)	0,21 (0,21; 0,21)	1,11 (0,21; 2,36)
	Média (DP)	2,52 (1,77)	0,21 (0,00)	0,21 (NA)	2,72 (4,36)
Th	Mediana (Q1; Q3)	1,42 (0,86; 2,20)	0,34 (0,23; 0,45)	0,07 (0,07; 0,07)	0,36 (0,22; 2,38)
	Média (DP)	1,51 (0,96)	0,34 (0,31)	0,07 (NA)	3,72 (8,35)
Ra-226	Mediana (Q1; Q3)	0,89 (0,46; 2,43)	0,13 (0,10; 0,15)	0,04 (0,04; 0,04)	0,67 (0,02; 4,69)

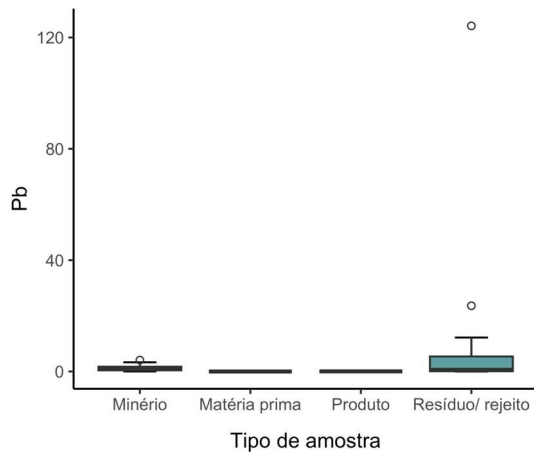
Ra-228	Média (DP)	1,45 (1,42)	0,13 (0,07)	0,04 (NA)	172,46 (528,99)
	Mediana (Q1; Q3)	0,92 (0,37; 1,25)	0,27 (0,19; 0,35)	0,09 (0,09; 0,09)	1,50 (0,23; 14,85)
Pb-210	Média (DP)	0,98 (0,85)	0,27 (0,23)	0,09 (NA)	445,54 (1355,14)
	Mediana (Q1; Q3)	0,88 (0,44; 1,71)	0,02 (0,02; 0,02)	0,06 (0,06; 0,06)	0,60 (0,10; 5,41)
	Média (DP)	1,28 (1,27)	0,02 (0,00)	0,06 (NA)	13,10 (34,07)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75)

Fonte: A autora, 2024.

Figura 15 – Gráficos boxplot para concentração de atividade dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações de titânio (n = 28)





Legenda: Teste de Kruskal-Wallis
 Fonte: A autora, 2024.

Tabela 21 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações de mineração e beneficiamento de titânio

Instalação	Amostra	Concentração de atividade					
		U	Th	Ra-226	Ra-228	Pb	Total
Usina	Lama neutralizada	0,21	0,27	0,01	1,61	0,57	20,10
	Efluente final	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,09
	Rej. tecido TF	0,21	0,07	312,12	855,31	23,63	8.787,00
	Rej. tecido HD	0,21	0,27	1.909,74	4.887,23	124,16	50.930,00
	Resíduo HD	0,21	0,07	0,02	0,06	0,04	1,80
Mina	Rejeito da Concentração flutuante	0,63	0,22	0,01	0,01	0,01	3,57
	Rejeito	1,11	0,36	0,09	0,23	0,10	8,85
	Rejeito	8,40	10,93	4,69	14,85	5,41	230,94
	Material não magnético	2,36	2,67	1,96	3,24	1,55	60,04
	Rejeito	1,12	0,42	0,31	0,23	0,28	10,79
	Rejeito	15,05	29,72	10,59	27,13	12,20	449,25
	Rejeito	3,78	2,38	1,82	1,50	1,77	51,05
	Rejeito	2,12	0,97	0,67	0,62	0,60	22,96

Fonte: A autora, 2024.

4.1.6 Terras raras

As terras raras são um grupo de 17 elementos químicos cruciais para a indústria. Esses elementos são fundamentais na fabricação de uma ampla gama de dispositivos de alta tecnologia, incluindo ímãs permanentes usados em turbinas eólicas e veículos elétricos, sistemas de propulsão para veículos híbridos, discos rígidos, smartphones e tablets. Além disso, as terras raras desempenham um papel vital na produção de catalisadores para a indústria petroquímica, em materiais para a indústria de defesa e em várias aplicações de iluminação, como lâmpadas fluorescentes e LED. Sua importância estratégica e funcionalidade única em

aplicações que exigem propriedades elétricas, magnéticas e luminescentes específicas, as tornam indispensáveis para o avanço e a inovação em tecnologias emergentes e sustentáveis (LUZ; LINS, 2008).

O Brasil é o segundo maior detentor de reservas de terras raras (18,2%), depois da China (42,3%), com reservas nos estados de Minas Gerais e de Goiás. Apesar dessas reservas, o Brasil não teve produção interna em 2015 e, em 2016, comercializou apenas monazita, proveniente do estoque das Indústrias Nucleares do Brasil (ANM, 2019).

Como apresentado na Tabela 22, o rol de instalações minero-industriais sob controle regulatório compreende duas instalações para produção de terras raras. As instalações estão na fase pré-operacional e as amostras de processo são de usina piloto.

Tabela 22 – Categoria, concentração de atividade e amostra relacionada em instalações minero-industriais de terras raras

Instalação	Categoria	Concentração de atividade total (Bq/g)	Amostra com maior concentração de atividade
Mina	II	281,66	Minério
Usina	II	136,29	Impureza

Fonte: A autora, 2024.

Para terras raras, as concentrações de atividade dos radionuclídeos não variaram de acordo com o tipo de amostra. Esses resultados estão detalhados na Tabela 23 e representados na Figura 16. Contudo, nas amostras da usina, o tório é o radionuclídeo com maior concentração de atividade (44,25 Bq/g), e estão presentes, em menor concentração, o urânio (5,54 Bq/g) e o chumbo (4,08 Bq/g).

Tabela 23 – Concentração de atividade de radionuclídeos de acordo com o tipo de amostra, para instalações minero-industriais de terras raras (n = 7)

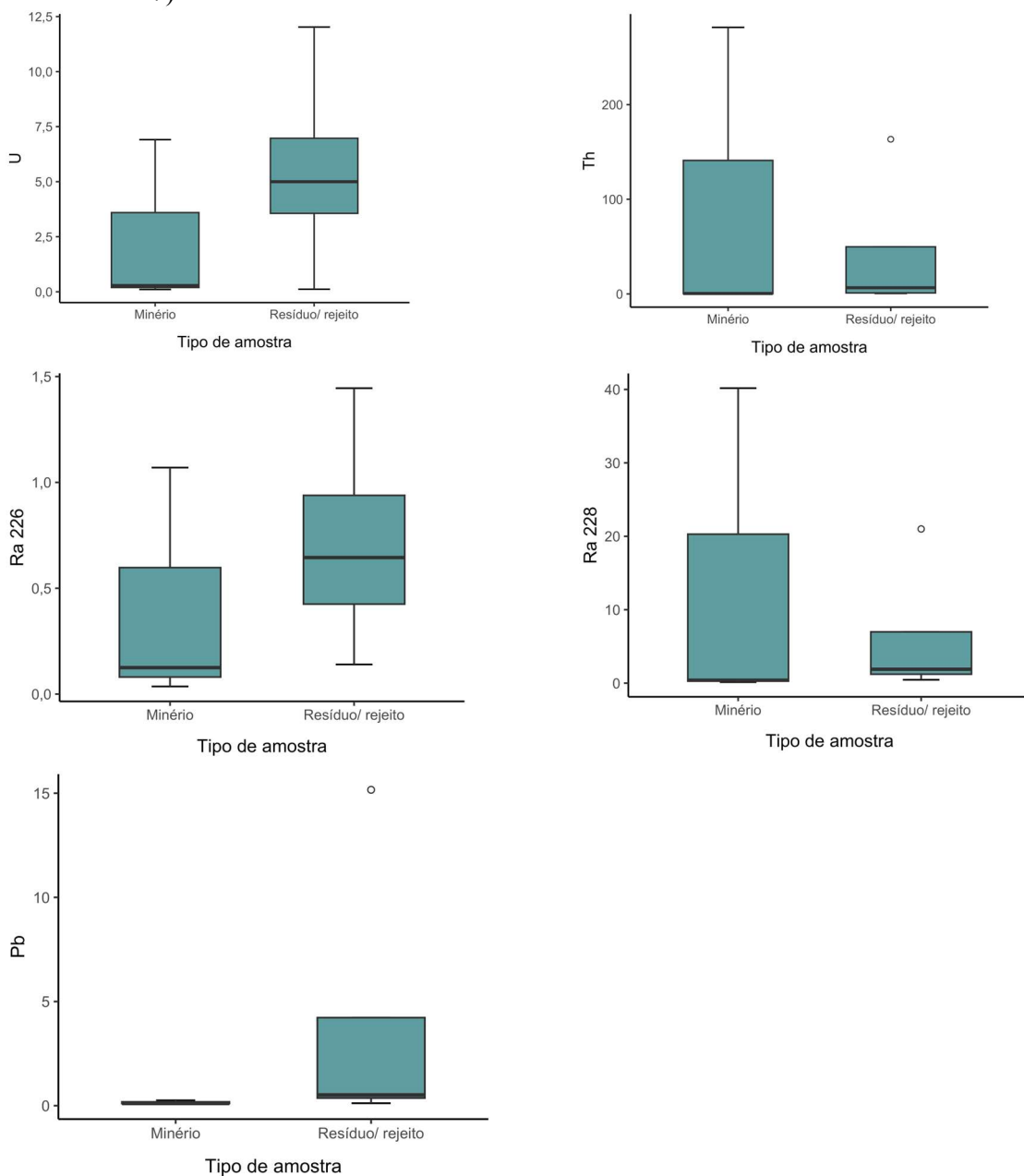
Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra	
		Minério (n = 3)	Resíduo/rejeito (n = 4)
U	Média (DP)	2,43 (3,88)	5,54 (4,91)
	Mediana (Q1; Q3)	0,28 (0,19; 3,60)	5,00 (3,56; 6,97)
Th	Média (DP)	94,07 (162,46)	44,25 (79,60)
	Mediana (Q1; Q3)	0,46 (0,28; 141,06)	6,54 (1,03; 49,76)
Ra-226	Média (DP)	0,41 (0,57)	0,72 (0,55)
	Mediana (Q1; Q3)	0,12 (0,08; 0,60)	0,64 (0,43; 0,94)
Ra-228	Média (DP)	13,57 (23,04)	6,31 (9,82)
	Mediana (Q1; Q3)	0,40 (0,27; 20,29)	1,89 (1,22; 6,98)
Pb-210	Média (DP)	0,16 (0,08)	4,08 (7,39)

Radio-nuclídeo	Variável	Tipo de amostra	
		Minério (n = 3)	Resíduo/rejeito (n = 4)
	Mediana (Q1; Q3)	0,11 (0,11; 0,18)	0,52 (0,37; 4,23)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75)

Fonte: A autora, 2024.

Figura 16 – Gráficos boxplot para concentração dos radionuclídeos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 por tipo de amostras em instalações minero-industriais de terras raras (n = 7)



Fonte: A autora, 2024.

A Tabela 24 apresenta a concentração dos isótopos U, Th, Ra-226, Ra-228 e Pb-210 nas amostras de resíduos/rejeitos. Ressalta-se, contudo, que a amostra é pequena e relativa a

instalações pré-operacionais, podendo levar a resultados não representativos, a uma maior margem de erro e à reclassificação posterior, nos termos da Norma CNEN-NN-4.01.

Tabela 24 – Concentração de atividade total e por radionuclídeo em amostras de resíduos e rejeitos de instalações de mineração e beneficiamento de terras raras

Instalação	Amostra	Concentração de atividade					
		U	Th	Ra-226	Ra-228	Pb	Total
Piloto	Estéril	4,71	11,88	0,52	1,47	0,58	11,88
	Estéril	5,29	163,40	0,77	21,00	0,45	163,40
Piloto	Resíduo de lixiviação	0,12	0,54	0,14	0,46	0,12	6,42
	Impureza precipitada	12,03	1,19	1,45	2,31	15,16	136,29

Fonte: A autora, 2024.

4.2 Estimativa de dose ocupacional

A exposição ocupacional à radiação ionizante no ambiente de trabalho surge tanto da exposição direta a fontes de radiação externas quanto da exposição a fontes internas decorrente da ingestão, inalação ou absorção cutânea de radionuclídeos. Certos ambientes laborais apresentam riscos de exposição externa, exclusivamente, enquanto outros apresentam riscos potenciais de exposição tanto interna quanto externa (UNSCEAR, 2022).

A mineração e o processamento mineral lidam com uma vasta gama de materiais e envolvem grande variedade de processos. Devido à presença de materiais radioativos em variadas concentrações em todos os recursos naturais, tais atividades podem levar a uma exposição significativa dos trabalhadores à radiação. A exposição desses trabalhadores à radiação varia significativamente, a depender de fatores como o tipo de indústria, as condições de trabalho, bem como os tipos de radionuclídeos envolvidos e suas propriedades físicas e químicas (ICRP, 2019).

Os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) à radiação possuem direitos e responsabilidades estabelecidos para sua proteção contra riscos radiológicos, estando sujeitos a regulamentações e controles definidos por órgãos reguladores nacionais. A avaliação da exposição desses trabalhadores pode ser realizada por meio de monitoração individual, executada como parte da monitoração definida no programa de proteção radiológica; a UNSCEAR, contudo, reconhece que parcela significativa dos trabalhadores não é monitorada individualmente. Alternativamente, pode-se optar pela monitoração ambiental do local de trabalho (UNSCEAR, 2022).

Nos processos de autorização analisados neste trabalho, não foi possível identificar o número de trabalhadores nas instalações minero-industriais reguladas, assim como não foi

possível identificar em quais instalações os IOE utilizam monitores individuais de dose. Ressalta-se, contudo, que a inexistência de monitoração individual em uma instalação não configura necessariamente um descumprimento das normas de proteção radiológica. Sobre a exposição ocupacional, a Norma CNEN-NN-3.1 preconiza que:

Qualquer IOE que possa receber uma exposição ocupacional sujeita a controle deve ser submetido à monitoração individual, sempre que adequada, apropriada e factível. Nos casos em que a monitoração individual não for aplicável, a avaliação da exposição ocupacional do IOE tomará como base os resultados da monitoração da área e as informações sobre as atividades do IOE na área (CNEN, 2005).

Os dados de dose apresentados nesta seção são relativos aos levantamentos radiométricos realizados pela CNEN durante inspeções nas instalações. O levantamento radiométrico tem como objetivo a avaliação da dose de radiação emitida em áreas onde há fontes de radiação ou nas adjacências, permitindo verificar se os níveis de dose a que estão expostos trabalhadores e indivíduos do público estão de acordo com os limites estabelecidos.

Os valores de dose apresentados são uma estimativa da contribuição da exposição externa devido à radiação gama para a dose efetiva (E) que é o somatório da dose efetiva devido à exposição externa e da dose efetiva comprometida durante qualquer período de tempo, proveniente da incorporação de radionuclídeos (CNEN, 2011a). Neste trabalho, para cálculo da estimativa de dose externa, considerou-se uma jornada de trabalho anual de 2.000 horas com fator de ocupação igual a 1, ou seja, presume-se, conservadoramente, que o trabalhador cumpre sua jornada integralmente em local com exposição à radiação. Os dados levantados são apresentados na Tabela 24.

A maior taxa de dose ocupacional, devido à radiação gama, estimada nas instalações variou de 0,36 mSv/ano a 720 mSv/ano. Nas instalações de processamento de minérios para produção de estanho, as maiores taxas de dose variam de 0,36 mSv/ano a 134 mSv/ano; nas instalações para produção de nióbio, incluindo mineração, a variação foi de 7,22 mSv/ano a 157 mSv/ano; nas de fosfato, os valores mínimo e máximo das maiores taxas de dose foram 1,05 mSv/ano e 5,76 mSv/ano, respectivamente.

As instalações de produção de dióxido de titânio e carvão possuem apenas um registro e, consequentemente, um valor máximo de taxa de dose ocupacional. Na instalação de mineração de carvão, a maior taxa de dose medida foi de 5 mSv/ano e na de dióxido de titânio, 720 mSv/ano. As instalações de terras raras estão na fase piloto e não possuem registros de levantamentos radiométricos.

De modo geral, as doses ocupacionais registradas nas instalações ficaram abaixo do limite de 20 mSv/ano. Ressalva-se contudo, que na determinação da dose ocupacional,

considerou-se uma jornada de trabalho anual de 2.000 horas realizada inteiramente no local onde a taxa de dose mais alta foi registrada, no entanto, compreende-se que o cenário é bem conservador e esta é uma superestimação. O documento *“Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials”* sugere que um trabalhador seja exposto à radiação gama por 400 horas anuais, a 1 metro de distância de grandes quantidades de material (IAEA, 2006). A adoção dessa jornada de trabalho sugerida reduz as doses registradas na Tabela 25 em até 80%.

Tabela 25 – Dose externa (mSv/ano) estimada para trabalhadores em instalações minero-industriais, por tipo de minério

Minério	Instalação	Maior taxa de dose (mSv/a)	Área da maior taxa de dose	Taxa de dose média (mSv/a)
Fosfato	Usina	1,72	Terminal de rochas	0,63
	Usina	2,44	Mina	0,53
	Usina	5,76	Depósito de estéril	1,05
	Mina	3,86	Frente de lavra titânio	1,26
	Usina	3,52	Tecido filtrante	0,54
	Usina	2,44	Lavra	0,53
	Mina	5,76	Depósito de estéril	3,78
	Usina	ND*	ND	ND
	Usina	1,05	Galpão de estocagem de rocha	0,48
	Usina	ND	ND	ND
	Mina	ND	ND	ND
Estanho	Mina	2,4	Concentrado mineral	0,9
	Usina	5,6	Concentrado mineral	1,68
	Usina	3	Metalurgia	0,82
	Usina	18,8	Pilha de escória	9,18
	Mina	0,36	Beneficiamento	0,25
	Usina	2,44	Separadora	1,04
	Usina	134	Pilha de escória	19,43
	Mina	14,8	Frente de lavra	-
	Usina	110,6	Slag pile	16,69
	Usina	13,76	Pilha de escória	3,8
	Usina	18,26	Deposito de escória	11,45
Nióbio	Usina	18	Estocagem	3,34
	Mina	17	Estocagem de minério	5,8
	Mina	9,36	Frente de lavra	5,52
	Usina	148,76	Filtro de manga	11,38
	Usina	50,8	Escória	20,76
	Usina	34	Escória	5,34
	Mina	7,22	Frente de lavra	1,45
	Usina	157	Metalurgia	16,81
Carvão	Mina	5	Pátio de cinzas	0,86
Titânio	Usina	720	Bags de tecido filtrante	69,06

	Mina	ND	ND	ND
Terras raras	Mina	ND	ND	ND
	Usina	ND	ND	ND

Legenda: ND = dados não disponíveis.

Fonte: A autora, 2024.

Ainda que haja evidências de que a jornada de trabalho não seja integralmente cumprida em local de exposição ou, ainda, da maior taxa de exposição, a relevância dessa tabela reside na possibilidade de comparar instalações que processam o mesmo tipo de minério ou material e de avaliar uma correlação da dose com outras variáveis. Isso permite, numa abordagem sistêmica, a compreensão mais aprofundada das características das instalações minero-industriais e, numa análise individual, no contexto de uma instalação específica, a avaliação de áreas e processos relacionados onde é necessária maior atenção, seja para a avaliação da dose, seja para a adoção de medidas de proteção.

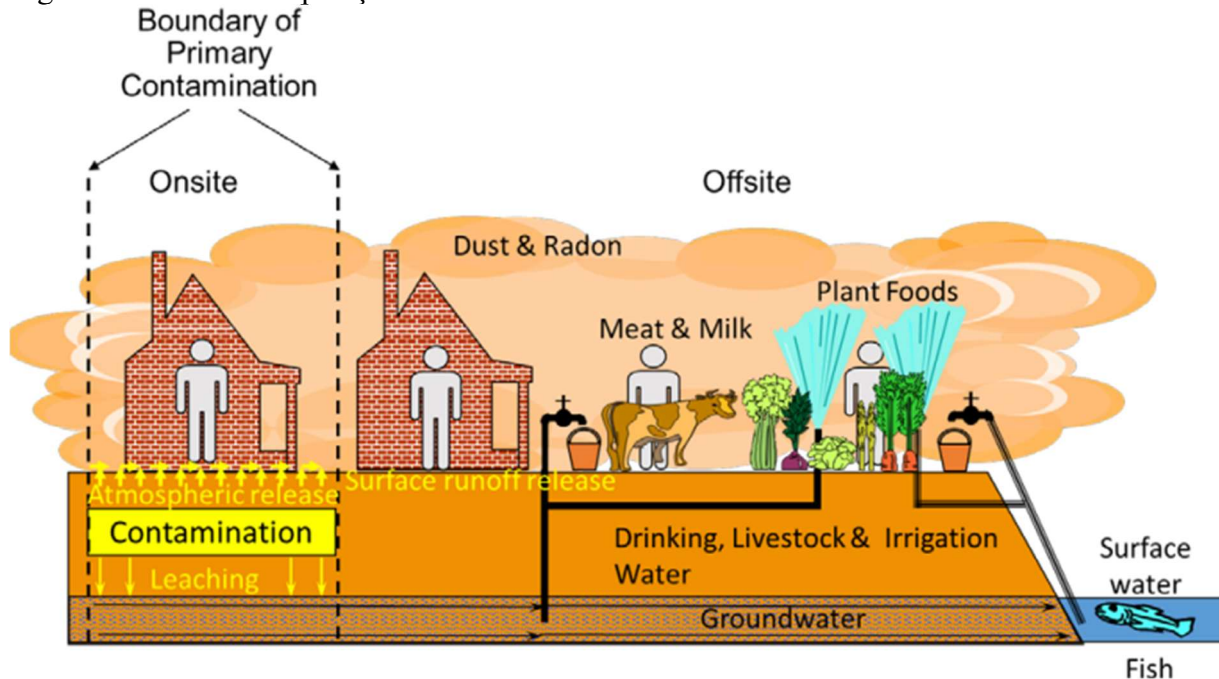
4.3 Estimativa do impacto radiológico ambiental

A modelagem radiológica ambiental realizada neste estudo teve como objetivo fornecer uma estimativa e comparar potenciais impactos radiológicos ambientais associados a rejeitos radioativos em instalações minero-industriais. As informações para a avaliação do impacto radiológico ambiental constantes nos processos de autorização consultados para esta pesquisa foram insuficientes para a modelagem de instalações específicas, tendo sido feita simulação genérica. Para isso, foram delineados três cenários distintos, nos quais a única variável alterada foi a concentração de atividade dos radionuclídeos presentes no rejeito, de forma a representar as três categorias de instalação, conforme a Norma CNEN-NN-4.01. Todas as demais variáveis envolvidas permaneceram constantes ao longo da modelagem, de forma a garantir consistência e permitir comparação dos resultados obtidos. Para o termo fonte foram considerados os radionuclídeos das séries do U-238 e do Th-232, excluídos radionuclídeos com meia-vida inferior a 30 dias, e uma área de deposição de 10.000 m² e altura de 2 m. Foi também considerado o equilíbrio radioativo nas subséries do U-238 (U-238, Ra-226 e Pb-210) e do Th-232 (Th-232 e Ra-228).

O código utiliza as liberações de contaminantes da contaminação primária para a atmosfera, para o escoamento superficial e para as águas subterrâneas. Em relação às vias de exposição, considerou-se a exposição à radiação gama devido à radiação no solo, inalação de particulados e ingestão de alimentos e água da área de contaminação secundária, conforme

Figura 17. Os coeficientes de dose interno e externo foram obtidos a partir da ICRP 60 (ICRP, 1991) e, para a ocupação, presumiu-se um indivíduo com residência em área vizinha à área de deposição, mas sem acesso à contaminação primária, que passa metade do tempo em casa e 12 horas fora de casa, em atividades diversas, que cultiva frutas, hortaliças, pasto e grãos no terreno e que consome esses alimentos.

Figura 17 – Vias de exposição



Fonte: RESRAD, 2020

O período de avaliação dos impactos radiológicos foi de 50 anos. Esse período foi definido com base no escopo da Norma CNEN-NN-4.01, que abrange apenas a deposição inicial em instalações minero-industriais, visto que a deposição final de rejeitos radioativos deve ser realizada de acordo com norma específica (CNEN, 2016).

Ressalta-se que o cenário desenvolvido e apresentado nesta análise não é relativo a dados específicos de nenhuma instalação existente, tampouco reflete as condições de vida de indivíduos residentes nas áreas afetadas. Essa modelagem é um exercício comparativo dos potenciais impactos radiológicos de instalações minero-industriais de acordo com categorias definidas na norma.

Os dados de concentração de atividade modelados para cada categoria são apresentados na Tabela 26 e as doses resultantes por via de exposição, na Tabela 27 e nas figuras 18 a 20.

Tabela 26 – Concentrações de atividade utilizadas para a modelagem, por categoria da instalação

Radionuclídeo	Concentração de atividade (Bq/g)		
	Categoria III	Categoria II	Categoria I
Pb-210	0,44	0,08	0,5
Po-210	0,44	0,08	0,5
Ra-226	3,86	7,11	36,5
Ra-228	2,87	15,33	81,2
Th-228	2,87	15,33	81,2
Th-230	3,26	6,03	47
Th-232	2,71	11,711	87
U-234	3,26	6,03	47
U-238	3,26	6,03	47
Total	91	355	1274

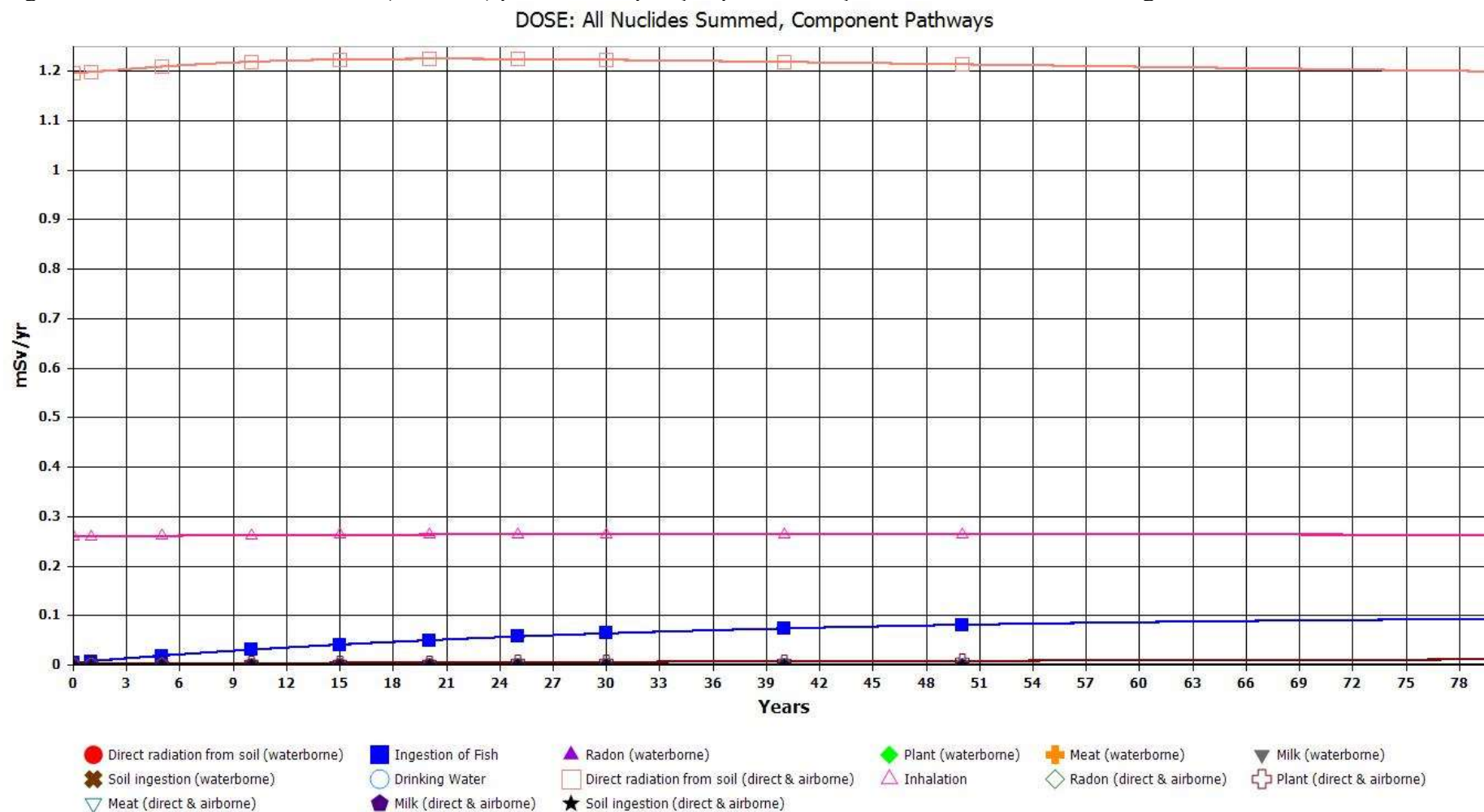
Fonte: A autora, 2024.

Tabela 27 – Dose total por categoria de instalação (mSv/ano), por tempo em anos

Tempo (anos)	0	1	5	10	15	20	25	30	40	50
Categoria III	0,075	0,075	0,075	0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076
Categoria II	0,265	0,263	0,251	0,241	0,235	0,232	0,231	0,23	0,23	0,23
Categoria I	1,462	1,469	1,493	1,151	1,533	1,544	1,552	1,558	1,565	1,569

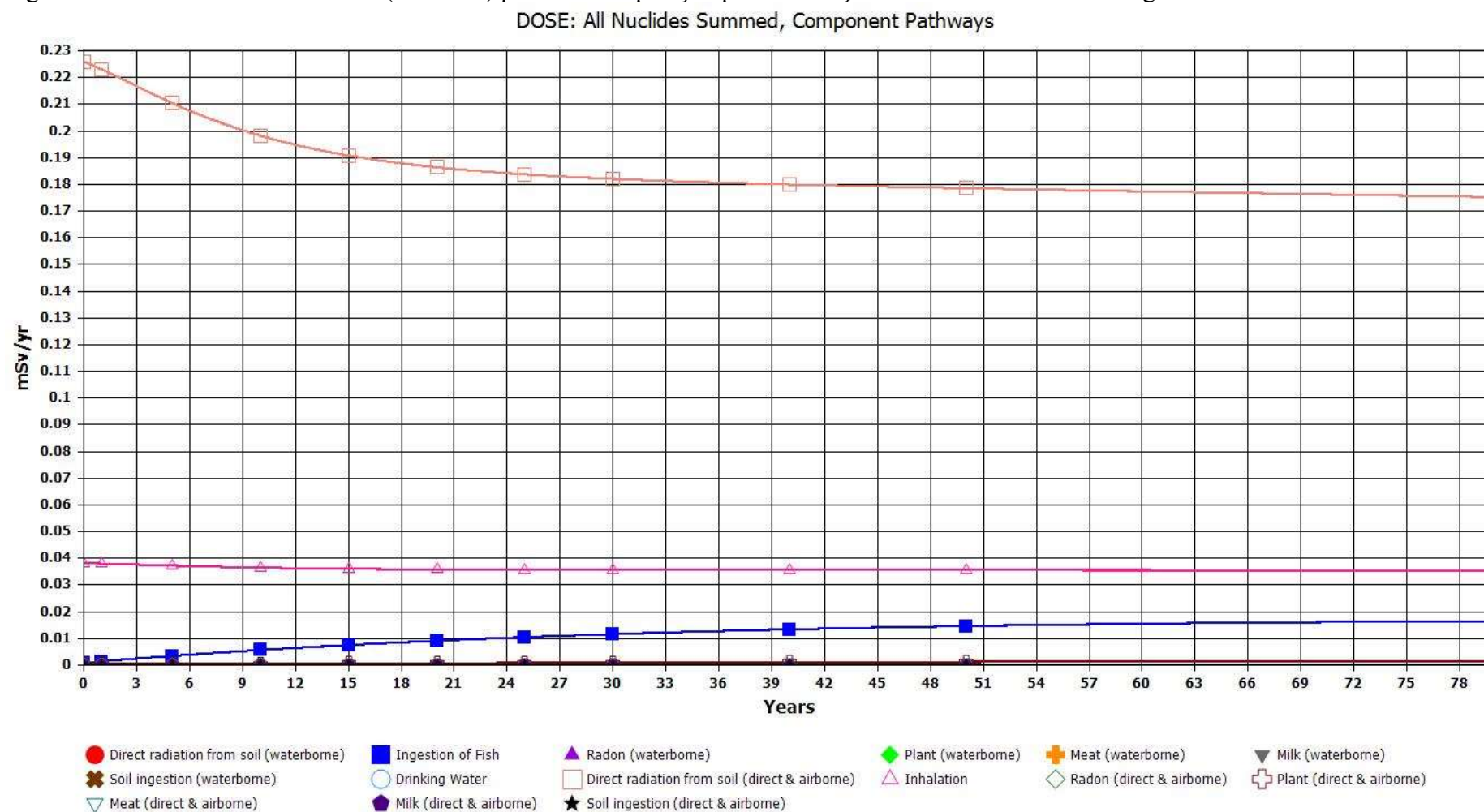
Fonte: A autora, 2024.

Figura 18 – Gráfico de dose externa (mSv/ano) por via de exposição para instalação minero-industrial de categoria I



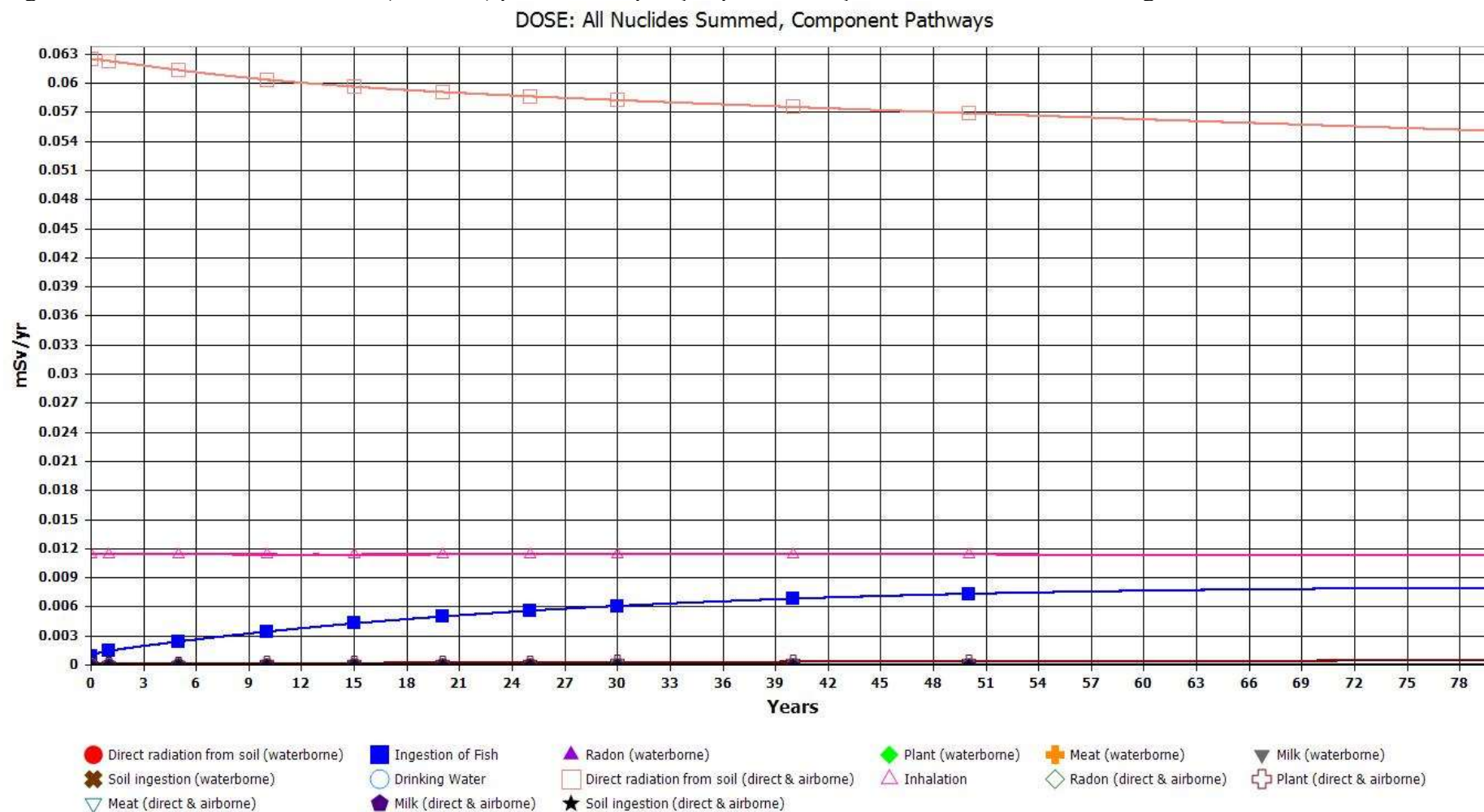
Fonte: Elaborada pela autora a partir dos resultados da modelagem no RESRAD, 2024.

Figura 19 – Gráfico de dose externa (mSv/ano) por via de exposição para instalação minero-industrial de categoria II



Fonte: Elaborada pela autora a partir dos resultados da modelagem no RESRAD, 2024.

Figura 20 – Gráfico de dose externa (mSv/ano) por via de exposição para instalação minero-industrial de categoria III



Fonte: Elaborada pela autora a partir dos resultados da modelagem no RESRAD, 2024.

Para os cenários modelados, as doses são maiores quanto maiores as concentrações de atividade. A via de exposição que mais contribui para a dose total é a exposição externa decorrente da concentração de radionuclídeos no solo e na pluma.

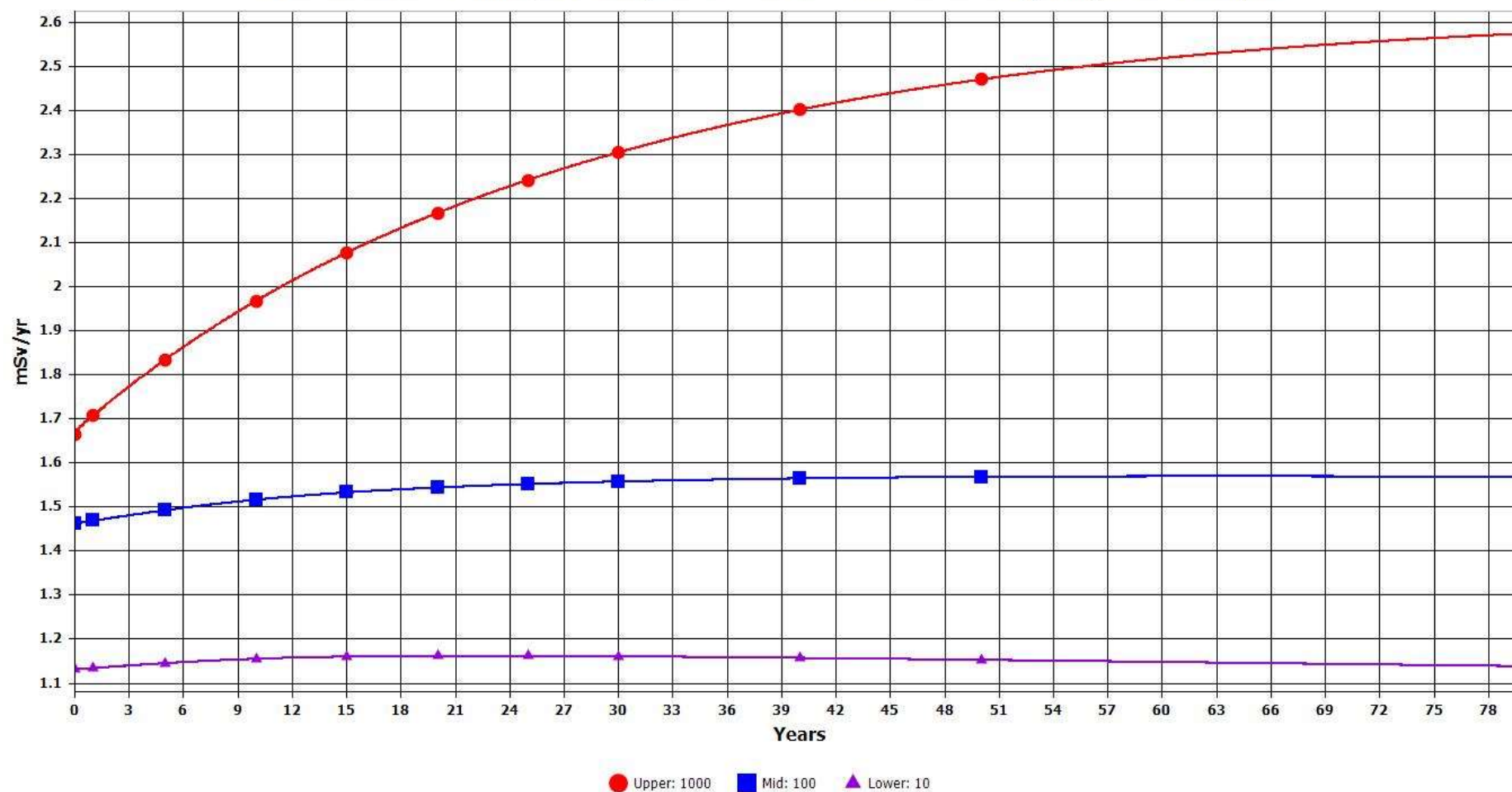
Para a análise de sensibilidade probabilística, dois parâmetros foram considerados como variáveis amostrais: área de contaminação e coeficiente de distribuição (k_d). A área da contaminação é reflexo da quantidade de rejeitos, o que influencia a dose (IAEA, 2006). O coeficiente de distribuição (k_d), quantifica a distribuição de um soluto entre duas fases, geralmente uma fase líquida e uma fase sólida, sob condições de equilíbrio. Um coeficiente de distribuição alto indica uma menor mobilidade do contaminante. Por outro lado, um k_d baixo sugere que o contaminante tem maior propensão a permanecer na fase líquida, podendo, portanto, se deslocar mais facilmente através do sistema (YU *et al.*, 1993).

Os resultados da análise de sensibilidade para a área de deposição para cada categoria são apresentados nas Figuras 21 a 23 e indicaram que, além da concentração de atividade, a quantidade de rejeitos e resíduos pode interferir de forma significativa para a contaminação ambiental e conseqüentemente para a dose no indivíduo do público. As simulações consideraram uma variação de 10 vezes no tamanho da área de deposição para menos e para mais em relação ao tamanho inicial modelado.

As simulações determinísticas mostraram diferenças de dose entre os cenários estabelecidos inicialmente e as quantidades de rejeitos depositados. Para instalações da categoria III, os valores totais de dose permaneceram abaixo do nível de restrição, de 0,3 mSv/ano (CNEN, 2011b), considerando uma variação de 10 vezes no tamanho da área de deposição para menos e para mais em relação ao tamanho inicial modelado. Na categoria I, todos os valores de dose ficaram acima do nível de restrição. Na categoria II, as doses ultrapassaram o nível de restrição apenas para a maior área de deposição.

Figura 21 – Gráfico de análise de sensibilidade da área de deposição para as instalações minero-industriais de categoria I

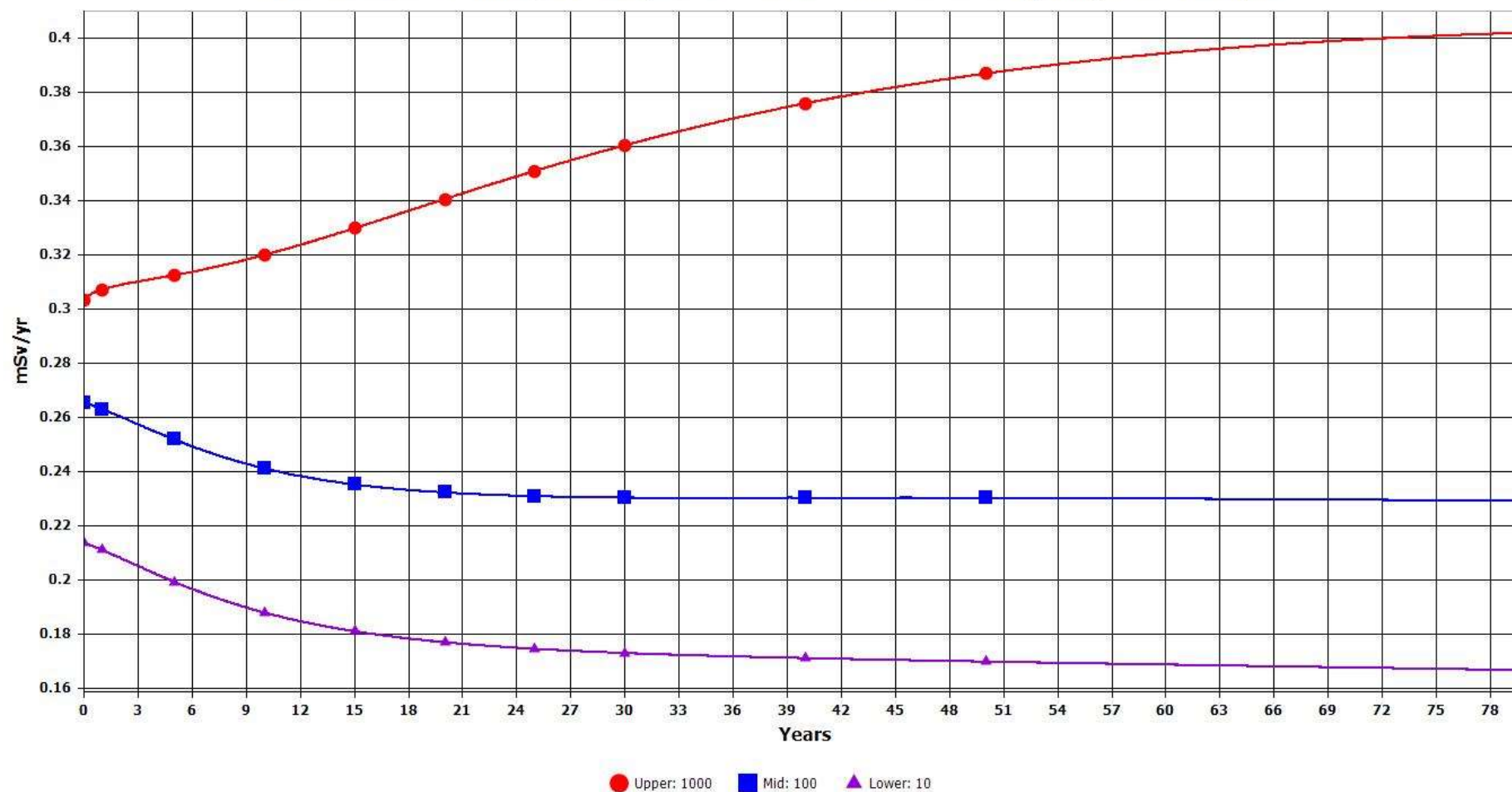
DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed With SA on X dimension of primary contamination; m



Fonte: Elaborada pela autora a partir dos resultados da modelagem no RESRAD, 2024.

Figura 22 – Gráfico de análise de sensibilidade da área de deposição para as instalações minero-industriais de categoria II

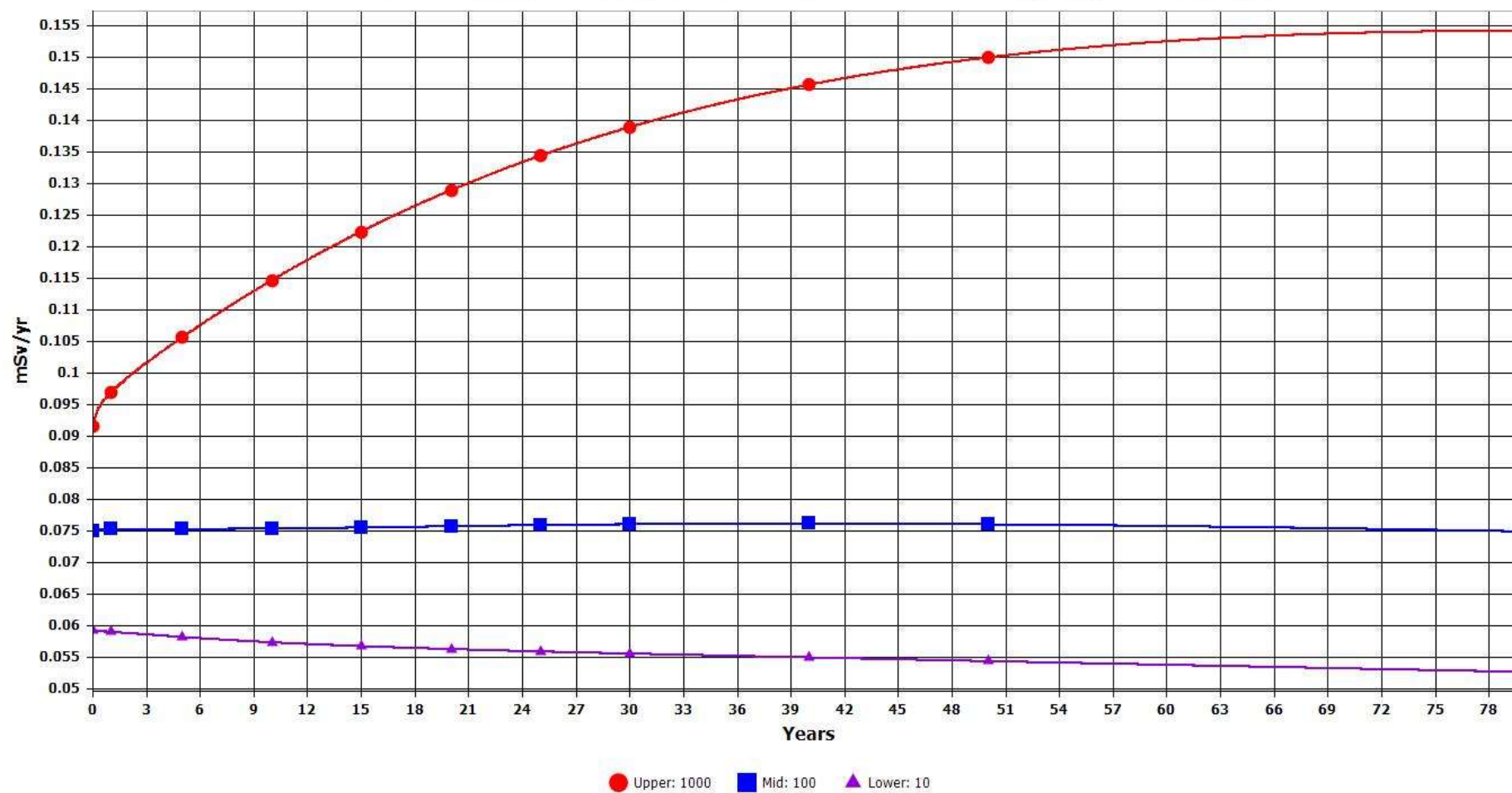
DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed With SA on X dimension of primary contamination; m



Fonte: Elaborada pela autora a partir dos resultados da modelagem no RESRAD, 2024.

Figura 23 – Gráfico de análise de sensibilidade da área de deposição para as instalações minero-industriais de categoria III

DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed With SA on X dimension of primary contamination; m



Fonte: Elaborada pela autora a partir dos resultados da modelagem no RESRAD, 2024.

4.2 Análise das variáveis relacionadas ao critério atual para estabelecimento de requisitos em radioproteção (concentração de atividade total)

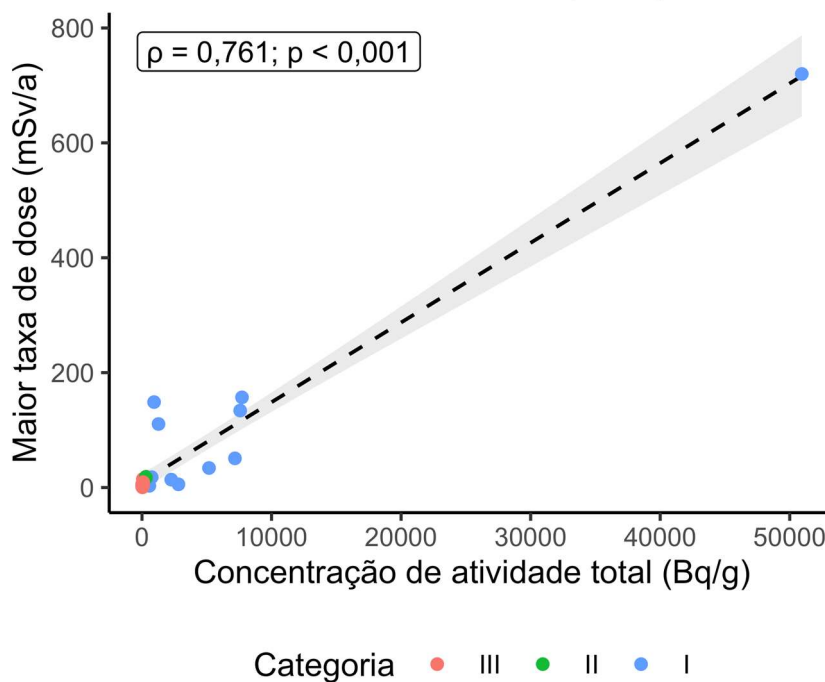
Neste tópico serão apresentados os resultados das análises de correlação entre as variáveis identificadas: dose externa ocupacional e concentração de atividade, categoria e tipo de amostra, tipo de instalação e tipo de amostra e concentração de atividade total e categoria x tipo de amostra.

4.2.1 Dose externa ocupacional e concentração de atividade

O teste de correlação de Spearman indicou haver uma associação estatisticamente significativa entre maior taxa de dose (mSv/ano) e concentração de atividade total ($\rho = 0,761$; $p < 0,001$). Trata-se de uma correlação positiva cuja intensidade pode ser classificada como alta.

Ao avaliarmos a correlação por categoria, observa-se que apenas a categoria I apresenta uma correlação estatisticamente significativa e moderada. As demais categorias não apresentam correlações estatisticamente significativas. As Figuras 24 e 25 mostram essas correlações.

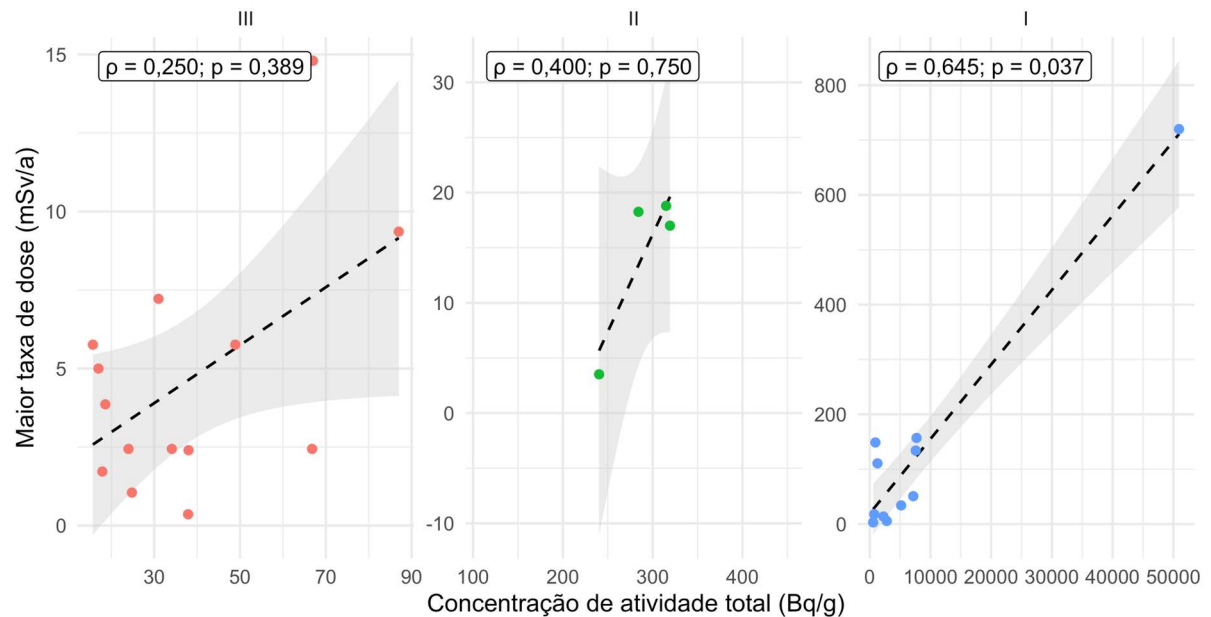
Figura 24 – Gráfico de dispersão para associação entre a maior taxa de dose (mSv/ano) e a concentração de atividade total (n = 35)



Legenda: A linha pontilhada indica a tendência linear dos pontos. A área sombreada corresponde ao intervalo de confiança para essa estimativa. Teste de correlação de Spearman.

Fonte: A autora, 2024.

Figura 25 – Gráfico de dispersão para associação entre concentração de atividade total e dose, por categoria (n = 35)



Legenda: A linha pontilhada indica a tendência linear dos pontos. A área sombreada corresponde ao intervalo de confiança para essa estimativa. Teste de correlação de Spearman.

Fonte: A autora, 2024.

O teste de Kruskal-Wallis indicou que as distribuições dos valores de maior taxa de dose (mSv/a) não diferem estatisticamente entre os grupos de minério ($\chi^2_{(3)} = 3,729$; $p = 0,292$; $\eta^2_{[H]} = 0,073$) para a categoria III, assim como para as categorias II ($\chi^2_{(2)} = 2,700$; $p = 0,259$; $\eta^2_{[H]} = 0,700$) e I ($\chi^2_{(2)} = 4,036$; $p = 0,133$; $\eta^2_{[H]} = 0,255$). Esses resultados estão detalhados nas Tabelas 28, 29 e 30.

A Figura 26 mostra os valores individuais, as medianas e os quartis 1 e 3 de maior taxa de dose (mSv/a) de acordo com o minério, para as Categorias III, II e I.

Tabela 28 – Taxa de dose externa ocupacional anual (mSv/a) de acordo com o minério, para categoria III (n = 14)

Minério	Medida	Resultado
Carvão	Mediana (Q1; Q3)	5,00 (5,00; 5,00)
	Média (DP)	5,00 (NA)
Estanho	Mediana (Q1; Q3)	2,42 (1,89; 5,53)
	Média (DP)	5,00 (6,61)
Fosfato	Mediana (Q1; Q3)	2,44 (2,08; 4,81)
	Média (DP)	3,29 (1,89)
Nióbio	Mediana (Q1; Q3)	8,29 (7,76; 8,82)
	Média (DP)	8,29 (1,51)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75); NA = não se aplica.

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 29 – Taxa de dose externa ocupacional (mSv/a) de acordo com o minério, para categoria II (n = 4)

Minério	Medida	Resultado
Estanho	Mediana (Q1; Q3)	18,53 (18,40; 18,67)
	Média (DP)	18,53 (0,38)
Fosfato	Mediana (Q1; Q3)	3,52 (3,52; 3,52)
	Média (DP)	3,52 (NA)
Nióbio	Mediana (Q1; Q3)	17,00 (17,00; 17,00)
	Média (DP)	17,00 (NA)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75); NA = não se aplica.

Fonte: A autora, 2024.

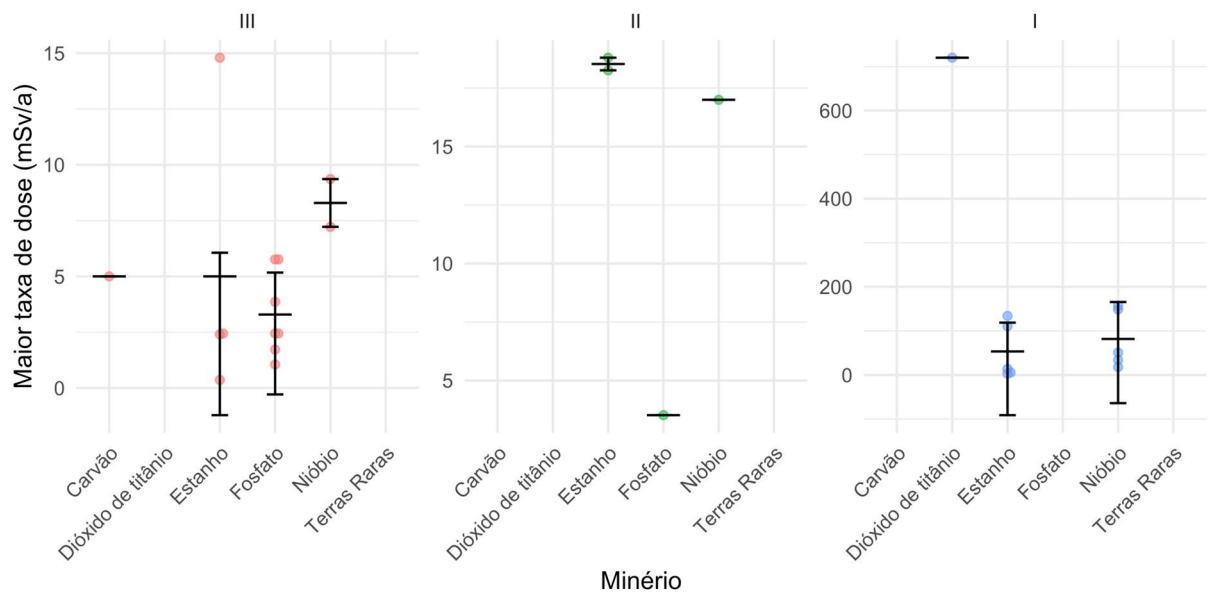
Tabela 30 – Taxa de dose externa ocupacional anual (mSv/a) de acordo com o minério, para Categoria I (n = 11)

Minério	Medida	Resultado
Dióxido de titânio	Mediana (Q1; Q3)	720,00 (720,00; 720,00)
	Média (DP)	720,00 (NA)
Estanho	Mediana (Q1; Q3)	13,76 (5,60; 110,60)
	Média (DP)	53,39 (63,57)
Nióbio	Mediana (Q1; Q3)	50,80 (34,00; 148,76)
	Média (DP)	81,71 (66,06)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75); NA = não se aplica.

Fonte: A autora, 2024.

Figura 26 – Gráfico de dispersão da maior taxa de dose (mSv/ano) de acordo com minério, para as Categorias I, II e III



Legenda: Dados expressos como mediana e amplitude interquartil. Teste de Kruskal-Wallis.

Fonte: A autora, 2024.

4.2.2 Categoria e tipo de amostra

O teste exato de Fisher indicou haver associação entre categoria e tipo de amostra da classificação ($p < 0,001$; $V = 0,646$). O tamanho de efeito V de Cramer observado pode ser classificado como grande.

A categoria I apresentou, com mais frequência, amostras classificadas como “resíduo/rejeito” e como “matéria-prima”. Por outro lado, essa categoria apresentou, com menos frequência, amostras dos tipos “matéria-prima, resíduos e produtos” e “minérios”.

A categoria II apresentou frequências aumentadas de amostras classificadas como “resíduo/rejeito” e diminuídas de amostras classificadas como “minério”. Já a Categoria III apresentou mais amostras classificadas como “minério” e como “matéria-prima, resíduos e produtos” e menos amostras classificadas como “matéria-prima” e “resíduo/rejeito”.

A Tabela 31 apresenta os resultados do teste exato de Fisher para a associação entre categoria e tipo de amostra da classificação, também representados na Figura 27.

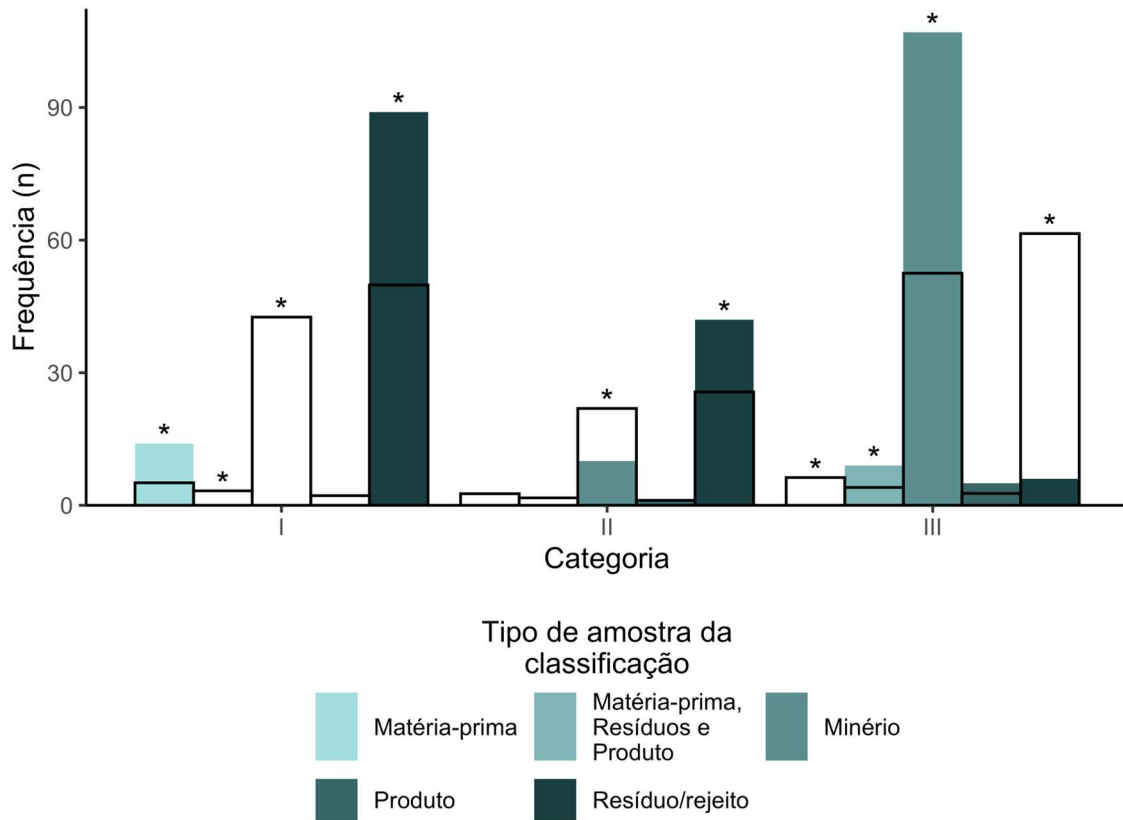
Tabela 31 – Teste exato de Fisher para associação entre categoria e tipo de amostra da classificação ($n = 283$)

Tipo de amostra da classificação - n (%)	I (n = 103)	II (n = 53)	III (n = 127)
Matéria-prima	14 (13,59)*	0 (0,00)	0 (0,00)*
Resíduo/rejeito	89 (86,41)*	42 (79,25)	6 (4,72)*
Minério	0 (0,00)*	10 (18,87)*	107 (84,25)*
Produto	0 (0,00)	1 (1,89)	5 (3,94)
Matéria-prima, resíduos e produto	0 (0,00)*	0 (0,00)*	9 (7,09)*

*Indica células nas quais os valores esperados diferem estatisticamente dos observados, de acordo com a análise dos resíduos padronizados ajustados.

Fonte: A autora, 2024.

Figura 27 – Gráfico das frequências (n) observadas e esperadas entre categoria da instalação e tipo de amostra da classificação



Legenda: As barras preenchidas correspondem às frequências observadas e as barras vazadas (contornadas em preto) correspondem às frequências esperadas caso não houvesse associação entre tipo de amostra da classificação e categoria. Teste exato de Fisher, seguido da análise dos resíduos padronizados ajustados. *Indica células nas quais os valores esperados diferem estatisticamente dos observados (n = 283).

Fonte: A autora, 2024.

4.2.3 Tipo de instalação e tipo de amostra

O teste exato de Fisher indicou haver associação entre tipo de instalação e tipo de amostra da classificação (teste exato de Fisher; $p < 0,001$; $V = 0,277$). O tamanho de efeito V de Cramer observado pode ser classificado como médio.

Minas apresentaram, com mais frequência, amostras classificadas como “matéria-prima, resíduos e produtos”. Usinas, por outro lado, apresentaram com menos frequência amostras classificadas como “matéria-prima, resíduos e produtos” e com mais frequência amostras classificadas como “matéria-prima”. Esses resultados estão detalhados na Tabela 32 e representados na Figura 28.

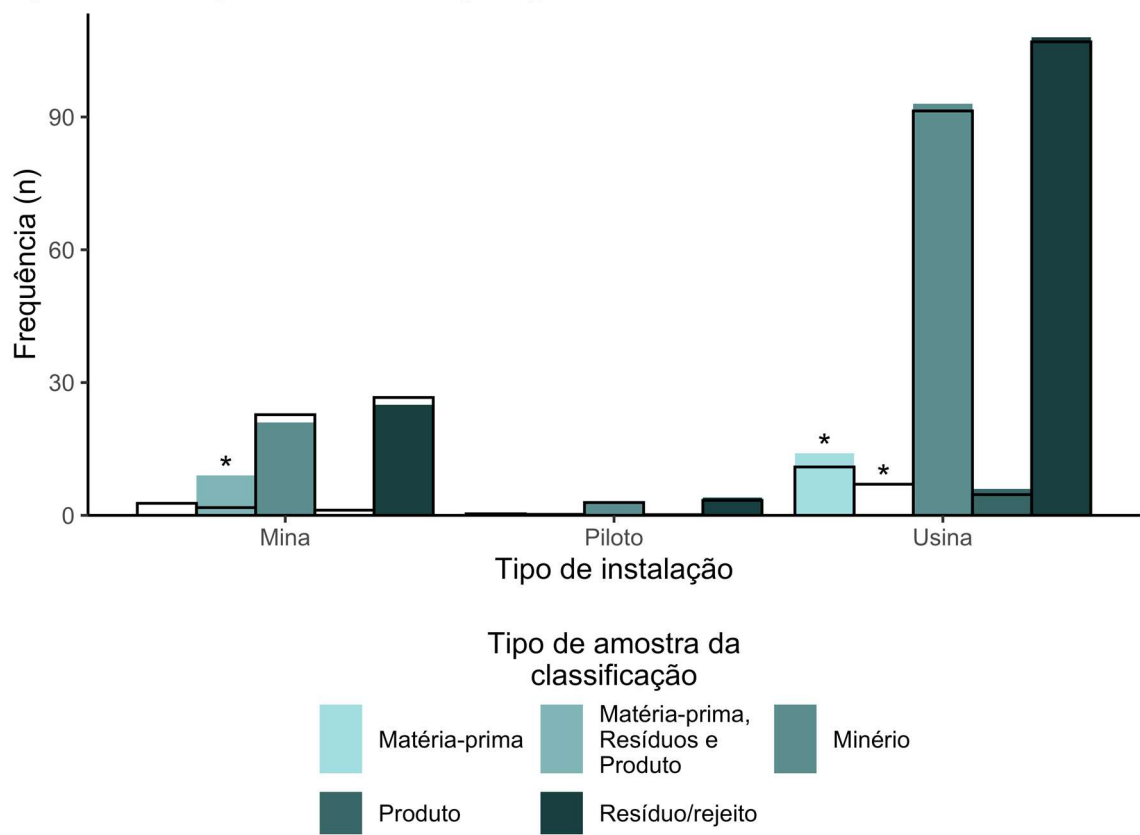
Tabela 32 – Teste exato de Fisher para a associação entre tipo de instalação e tipo de amostra da classificação (n = 283)

Tipo de amostra da classificação - n (%)	Mina (n = 55)	Piloto (n = 7)	Usina (n = 221)
Matéria-prima, resíduos e produto	9 (16,36)	0 (0,00)	0 (0,00)*
Minério	21 (38,18)*	3 (42,86)	93 (42,08)*
Resíduo/rejeito	25 (45,45)	4 (57,14)	108 (48,87)
Matéria-prima	0 (0,00)	0 (0,00)	14 (6,33)
Produto	0 (0,00)	0 (0,00)	6 (2,71)

*Indica células nas quais os valores esperados diferem estatisticamente dos observados, de acordo com a análise dos resíduos padronizados ajustados.

Fonte: A autora, 2024.

Figura 28 – Categoria da instalação por tipo de amostra da classificação



Legenda: Gráfico das frequências (n) observadas e esperadas de tipo de amostra da classificação para cada categoria de tipo de instalação. As barras preenchidas correspondem às frequências observadas e as barras vazadas (contornadas em preto) correspondem às frequências esperadas caso não houvesse associação entre tipo de amostra da classificação e tipo de instalação. Teste exato de Fisher, seguido da análise dos resíduos padronizados ajustados. *Indica células nas quais os valores esperados diferem estatisticamente dos observados (n = 283).

Fonte: A autora, 2024.

4.2.4 Concentração de atividade total e categoria x tipo de amostra

Para categoria III, apesar de o teste de Kruskal-Wallis ter indicado que as distribuições dos valores de concentração de atividade total (Bq/g) variam de acordo com tipo de amostra

($\chi^2_{(3)} = 9,316$; $p = 0,025$; $\eta^2_{[H]} = 0,051$), o post-hoc de Dunn-Bonferroni não detectou diferenças entre os grupos.

Essa divergência entre o resultado do teste de Friedman e o do teste post-hoc pode acontecer. Chen *et al.* (2018) apontam que discordâncias entre os resultados de testes *omnibus* – testes que comparam simultaneamente múltiplos grupos, como é o caso da ANOVA e do teste de Kruskal-Wallis – e seus respectivos post-hocs acontecem e que, nesses casos, o resultado do teste *omnibus* deve ser considerado um “alarme falso” (CHEN *et al.*, 2018). Soma-se a isso o fato de que o post-hoc recomendado para o teste de Kruskal-Wallis, o Dunn-Bonferroni, é um teste conservador, ou seja, com menor probabilidade de cometer erro do tipo I (falsos positivos), mas com maior probabilidade de cometer erro do tipo II (falsos negativos) (PEREIRA; AFONSO; MEDEIROS, 2015).

Os resultados estão detalhados na Tabela 33.

Tabela 33 – Teste de Kruskal-Wallis para Concentração de atividade (Bq/g) de acordo com Tipo de amostra, para Categoria III (n = 127)

Tipo de amostra	Medida	Resultado
Minério	Mediana (Q1; Q3)	24,80 (18,60; 38,00) a
	Média (DP)	33,61 (18,46)
Matéria-prima	Mediana (Q1; Q3)	34,10 (21,70; 41,50) a
	Média (DP)	33,06 (12,05)
Produto	Mediana (Q1; Q3)	18,50 (17,90; 24,80) a
	Média (DP)	24,60 (10,17)
Resíduo/rejeito	Mediana (Q1; Q3)	24,00 (18,60; 34,10) a
	Média (DP)	28,31 (14,26)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75).

Fonte: A autora, 2024.

Para a categoria II, o teste de Kruskal-Wallis indicou que as distribuições dos valores de concentração de atividade (Bq/g) não diferem estatisticamente entre os tipos de amostra ($\chi^2_{(3)} = 5,548$; $p = 0,136$; $\eta^2_{[H]} = 0,052$). Esses resultados estão detalhados na Tabela 34.

Para a categoria I, o teste de Kruskal-Wallis indicou que, as distribuições dos valores de concentração de atividade (Bq/g) não diferem estatisticamente entre os tipos de amostra ($\chi^2_{(3)} = 5,548$; $p = 0,136$; $\eta^2_{[H]} = 0,052$). Esses resultados estão detalhados na Tabela 35.

A Figura 29 mostra os valores individuais bem como as medianas e os quartis 1 e 3 de concentração de atividade (Bq/g) de acordo com o tipo de amostra, para as Categorias I, II e III.

Tabela 34 – Teste de Kruskal-Wallis para Concentração de atividade (Bq/g) de acordo com Tipo de amostra, para Categoria II (n = 53)

Tipo de amostra	Medida	Resultado
-----------------	--------	-----------

Tipo de amostra	Medida	Resultado
Minério	Mediana (Q1; Q3)	319,30 (315,00; 449,25)
	Média (DP)	348,06 (108,80)
Matéria-prima	Mediana (Q1; Q3)	240,40 (240,40; 240,40)
	Média (DP)	240,40 (NA)
Produto	Mediana (Q1; Q3)	254,41 (240,40; 315,00)
	Média (DP)	273,04 (38,73)
Resíduo/rejeito	Mediana (Q1; Q3)	315,00 (240,40; 449,25)
	Média (DP)	326,38 (106,06)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75).

Fonte: A autora, 2024.

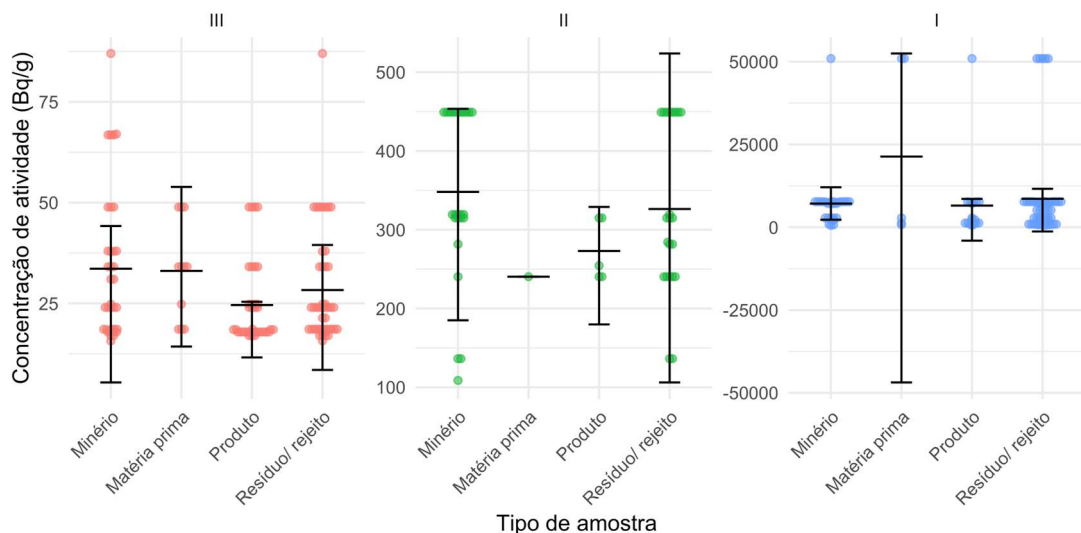
Tabela 35 – Teste de Kruskal-Wallis para concentração de atividade (Bq/g) de acordo com Tipo de amostra, para Categoria I (n = 53)

Tipo de amostra	Medida	Resultado
Minério	Mediana (Q1; Q3)	7173,00 (2813,00; 7718,00)
	Média (DP)	7140,26 (9167,61)
Matéria-prima	Mediana (Q1; Q3)	2813,00 (1274,00; 50930,00)
	Média (DP)	21338,72 (27023,69)
Produto	Mediana (Q1; Q3)	2259,00 (1274,00; 7578,00)
	Média (DP)	6545,26 (11824,90)
Resíduo/rejeito	Mediana (Q1; Q3)	5172,00 (1274,00; 7718,00)
	Média (DP)	8596,57 (14056,70)

Legenda: DP = desvio-padrão; Q1 = primeiro quartil (percentil 25); Q3 = terceiro quartil (percentil 75).

Fonte: A autora, 2024.

Figura 29 – Gráfico de dispersão da concentração de atividade, por tipo de amostra, para as categorias I, II e III



Legenda: Dados expressos como mediana e amplitude interquartil. Teste de Kruskal-Wallis.

Fonte: A autora, 2024.

CONCLUSÕES

A caracterização das instalações minero-industriais no Brasil realizada neste trabalho forneceu um panorama da classificação conforme a Norma CNEN-NN-4.01. Em relação à concentração de atividade, de 35 instalações minero-industriais, dez apresentaram concentração de atividade total acima de 500 Bq/g; nove, entre 100 e 500 Bq/g; e dezesseis, concentração total inferior a 100 Bq/g e superior ao limite de isenção, de 10Bq/g.

O levantamento das estimativas da dose externa ocupacional foi fundamental para avaliar os riscos à saúde associados à exposição de trabalhadores nessas instalações minero-industriais e identificou que, excetuando duas ocorrências, as doses anuais médias doses ficam abaixo do limite de 20 mSv/ano indicando baixo risco ocupacional nas instalações analisadas. Em cinco ocorrências, as doses máximas registradas excedem o limite de dose anual para trabalhador, sendo necessário pontuar que a estimativa considerou, conservadoramente, uma jornada de trabalho de 2.000 horas por ano, integralmente exercidas no local de maior exposição.

Adicionalmente, foi realizada também a estimativa da dose a que o público em geral pode estar exposto, a partir da análise de impacto radiológico ambiental de instalações das três categorias definidas na Norma CNEN-NN-4.01. As informações para a avaliação do impacto radiológico ambiental constantes nos processos foram insuficientes para a modelagem de instalações específicas.

A modelagem feita para a estimativa de dose em indivíduos do público para cenários hipotéticos evidenciou uma dependência da dose em relação à concentração de atividade, como já descrito na literatura. As simulações determinísticas, contudo, ressaltaram a diferença de dose entre os cenários inicialmente estabelecidos e as quantidades de rejeitos depositados.

Nos cenários hipotéticos para instalações da categoria III, os valores de dose permaneceram abaixo do nível de restrição, estipulado em 0,3 mSv/ano de acordo com a Posição Regulatória 3.01/004:2011 (CNEN, 2011b), mesmo considerando uma variação de 10 vezes na área de deposição – maior ou menor em relação ao tamanho inicialmente modelado. Para instalações da categoria I, todos os valores de dose ficaram acima do nível de restrição. As doses do cenário modelado para instalações da categoria II, contudo, ultrapassaram o nível de restrição apenas no caso da maior área de deposição.

A análise de sensibilidade revelou-se uma ferramenta importante para a melhor compreensão dos fatores contribuintes para a dose recebida pelo indivíduo do público. Uma conclusão desses testes é que, além da concentração de atividade, a quantidade de rejeitos e resíduos pode interferir de forma significativa para a contaminação ambiental e consequentemente para a dose no indivíduo do público.

Os testes de correlação entre a dose ocupacional e a concentração de atividade total revelaram uma associação estatisticamente significativa entre eles. Contudo, ao segmentar a análise por categoria (I, II ou III), notou-se que apenas a categoria I demonstra uma correlação estatisticamente significativa e de magnitude moderada; para as outras categorias (II e III), não foi constatada uma correlação estatisticamente relevante. Esse dado indica que o critério de concentração de atividade total, quando considerado isoladamente, não é um reflexo preciso do risco associado às instalações e atividades nas categorias II e III.

A modelagem feita para a estimativa de dose em indivíduos do público para cenários hipotéticos evidenciou uma dependência da dose em relação à concentração de atividade. As simulações determinísticas, contudo, ressaltaram a diferença de dose entre os cenários inicialmente estabelecidos e as quantidades de rejeitos depositados.

Nos cenários hipotéticos para instalações da categoria III, os valores de dose permaneceram abaixo do nível de restrição, estipulado em 0,3 mSv/ano de acordo com a Posição Regulatória 3.01/004:2011 (CNEN, 2011b), mesmo considerando uma variação de 10 vezes na área de deposição – maior ou menor em relação ao tamanho inicialmente modelado. Para instalações da categoria I, todos os valores de dose ficaram acima do nível de restrição. As doses do cenário modelado para instalações da categoria II, contudo, ultrapassaram o nível de restrição apenas no caso da maior área de deposição.

A análise de sensibilidade revelou-se uma ferramenta importante para a melhor compreensão dos fatores contribuintes para a dose recebida pelo indivíduo do público. Uma conclusão desses testes é que, além da concentração de atividade, a quantidade de rejeitos e resíduos pode interferir de forma significativa para a contaminação ambiental e consequentemente para a dose no indivíduo do público.

Esse dado reforça a necessidade de uma abordagem mais holística ao se avaliar impactos radiológicos potenciais de instalações e atividades. Em termos de regulação, fica claro que é importante ter um critério para triagem, como é o caso do estabelecido na Norma CNEN-NN-4.01, que se baseia na concentração de atividade total, mas também é importante que sejam realizadas análises radiológicas ocupacionais e ambientais para que as medidas de proteção sejam adequadas à instalação.

A adoção de uma abordagem gradual baseada tanto na concentração de atividade total quanto na dose estimada para indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público pode ser uma alternativa mais adequada para a regulamentação das instalações minero-industriais. Tal estratégia possibilitaria regulação e fiscalização mais eficazes, priorizando as situações que mais necessitam de intervenção.

Com isso, os requisitos estabelecidos seriam capazes de refletir de forma precisa os riscos associados a cada instalação, sem comprometer a proteção radiológica ou impor medidas que se mostrem desnecessárias. Essa abordagem asseguraria uma gestão equilibrada que otimiza a proteção e a eficiência do processo regulatório, de modo que os controles sejam implementados tendo como base a magnitude das exposições e do risco radiológico.

De forma geral, os objetivos deste trabalho foram atingidos. Contudo sugere-se, para trabalhos futuros, estudos específicos de análise de impacto radiológico ambiental, de forma a poder avaliar, a partir de dados reais o impacto das instalações minero-industriais na dose do público. Sugere-se também, atualização das quantidades de resíduos e rejeitos gerados nessas instalações; o estudo de suas características físico-químicas; e alternativas de reutilização, seguindo conceito de economia circular, ou ainda, de opções seguras para deposição.

REFERÊNCIAS

AIREY, Peter; HINTON, Thomas; TWINING, John. The Scientific Basis. *In*: TWINING, John R. **Tropical Radioecology**. [S. l.]: Elsevier, 2012. p. 1-57. (Radioactivity in the Environment, 18). ISBN 9780080450162. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045016-2.00001-1>. Acesso em: 29 abr. 2024.

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. **Marie Curie and the science of radioactivity – contents**. College Park, MD: AIP, c2020. Disponível em: <https://history.aip.org/exhibits/curie/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

ANL. **User's manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4**. Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code. Lemont, IL: Office of Nuclear Regulatory Research, 2020. Disponível em: https://resrad.evs.anl.gov/docs/RESRAD-OFFSITE_UsersManual.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro**: principais substâncias metálicas. Brasília, DF: ANM, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

ANM. **Sumário Mineral 2017**. Brasília, DF: ANM, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 29 abr. 2024.

ANM. **Sumário Mineral Brasileiro 2018**. Brasília, DF: ANM, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018>. Acesso em: 29 abr. 2024.

ARPANSA. **Safety Guide**: Monitoring, Assessing and Recording Occupational Radiation Doses in Mining and Mineral Processing. Melbourne: ARPANSA, 2011. (Radiation Protection Series Publication, 9.1). Disponível em: https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps9_1.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

BOURDON, B. *et al.* Introduction to U-series geochemistry. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, [s. l.], v. 52, n. 1, jan. 2003.

BRASIL. **Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962**. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1962. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4118.htm. Acesso em: 29 abr. 2024.

BRASIL. **Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974**. Altera a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, e a Lei nº 5.740, de 1 de dezembro de 1971, que criaram, respectivamente, a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN e a Companhia Brasileira de Tecnologia

Nuclear - CBTN, que passa a denominar-se Empresas Nucleares Brasileiras Sociedade Anônima - NUCLEBRÁS, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1974. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6189compilada.htm. Acesso em: 29 abr. 2024.

BRASIL. **Lei nº 7.781, de 27 de junho de 1989**. Dá nova redação aos artigos 2º, 10 e 19 da Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1989. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17781.htm. Acesso em: 29 abr. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021**. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN); altera as Leis nºs 4.118, de 27 de agosto de 1962, 6.189, de 16 de dezembro de 1974, 6.453, de 17 de outubro de 1977, 9.765, de 17 de dezembro de 1998, 8.691, de 28 de julho de 1993, e 10.308, de 20 de novembro de 2001; e revoga a Lei nº 13.976, de 7 de janeiro de 2020. Brasília, DF: Presidência da República, 2021a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/CCivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14222.htm. Acesso em: 29 abr. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.514, de 29 de dezembro de 2022**. Dispõe sobre a empresa Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB), sobre a pesquisa, a lavra e a comercialização de minérios nucleares, de seus concentrados e derivados, e de materiais nucleares, e sobre a atividade de mineração; dentre outros. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Lei/L14514.htm. Acesso em: 29 abr. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, p. 103, 22 de junho de 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/creg/resolucoes-da-creg/resolucao-no-2-de-31-de-agosto-de-2021-resolucao-no-2-de-31-de-agosto-de-2021-dou-imprensa-nacional.pdf/view>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CHAMBERS, D. B. Radiological protection in North American naturally occurring radioactive material industries. **Annals of the ICRP**, [S. l.], v. 44, n. 1, p. 202-213, jun. 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/0146645315572300>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CHEN, Tian *et al.* Relationship between omnibus and post-hoc tests: an investigation of performance of the F test in ANOVA. **Shanghai Archives of Psychiatry**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 60-64, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11919%2Fj.issn.1002-0829.218014>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5925602/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **CNEN NE 1.13**: Licenciamento de Minas e Usinas de Beneficiamento de Minérios de Urânio e/ou Tório. Rio de Janeiro: CNEN, 1989. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-1/grupo1-nrm113.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **CNEN NN 3.01**: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Rio de Janeiro: CNEN, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-nrm301.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **CNEN NN 4.01**: Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Minero-Industriais. Rio de Janeiro: CNEN, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-4/grupo4-nrm401.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **CNEN NN 6.02**: Licenciamento de Instalações Radiativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/NormaCNENNN6.02.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**. Rio de Janeiro: CNEN, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/glossario/glossario-do-setor-nuclear-e-radiologico-brasileiro.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **Posição Regulatória 3.01/004:2011**: Restrição de Dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas. Rio de Janeiro: CNEN, 2011b. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_04.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

CNEN. **Posição Regulatória 3.01/005**: Critérios para Cálculo de Dose Efetiva, a partir da Monitoração Individual. Rio de Janeiro: CNEN, 2011a. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_05.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

COSMO, Bruno Marcos Nunes *et al.* Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, Jaboticabal, v. 4, 2020. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/#!/ensino/departamentos/ciencias-da-producao-agricola/laboratorios/labmato/rab/volume-4-2020/rab202001/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

EISENBUD, Merrill; GESELL, Thomas F. **Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources**. 4. ed. Cambridge, MA: Academic Press, 1997.

FELICIANO, Vanusa Maria Delage. Conceitos gerais sobre radioatividade. *In*: REIS, Rócio G. dos (ed.). **NORM: Guia Prático**. Rio de Janeiro: IRD, 2016. Cap. 5A-4, p. 21-59.

IAEA. **Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials**. Viena: IAEA, 2006. (Safety Report Series, 49).

IAEA. **IAEA Nuclear Safety and Security Glossary**: Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response. Viena: IAEA, 2022.

IAEA. **Radiation Protection And Safety of Radiation Sources**: International Basic Safety Standards. Viena: IAEA, 2014. (IAEA Safety Standards Series, GSR Part 3).

IAEA. **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources**. Viena: IAEA, 1996. (IAEA Safety Series, 115).

ICR. **International recommendations for X-ray and Radium protection**: a report of the Second International Congress of Radiology. Stockholm: P.A. Nordstedt & Soner, 1929. p. 62-73.

ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 21, n. 1-3, 1991. (ICRP Publication, 60).

ICRP. ICRP Statement on Tissue Reactions: early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 41, n. 1/2, 2012. (ICRP Publication, 118).

ICRP. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 35, n. 4, 2005. (ICRP Publication, 99).

ICRP. Radiological protection from cosmic radiation in aviation. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 45, n. 1, p. 1-48, 2016. (ICRP Publication, 132).

ICRP. Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 48, n. 4, 2019. (ICRP Publication, 142).

ICRP. Recommendations of the ICRP. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 1, n. 3, 1977. (ICRP Publication, 26).

ICRP. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (wR). **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 33, n. 4, 2003. (ICRP Publication, 92).

ICRP. **Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation**. London: Pergamon Press, 1960. (ICRP Publication, 2).

ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 37, n. 2-4, 2007. (ICRP Publication, 103).

ICRU. ICRU Report 95: Operational quantities for external radiation exposure. **Journal of the ICRU**, Oxford, v. 20, n. 7, 2020.

ICRU. ICRU Report no. 85: Fundamental quantities and units for ionizing radiation. **Journal of the ICRU**, Oxford, v. 11, n. 1, Oct. 2011.

IRD. Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes. **Grandezas e unidades para radiação ionizante**: (recomendações e definições). Rio de Janeiro: IRD, 2002. Revisado em Outubro de 2011. Coordenação de redação: Manoel Mattos Oliveira Ramos, Luiz Tauhata.

JEFFRIES, Cameron *et al.* Regulation of naturally occurring radioactive materials in Australia. **Radiation protection dosimetry**, Oxford, v. 146, n. 1-3, p. 174-177, 2011. DOI 10.1093/rpd/ncr141. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21515621/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

LAURIER, Dominique *et al.* The scientific basis for the use of the linear no-threshold (LNT) model at low doses and dose rates in radiological protection. **Journal of Radiological Protection**, [s. l.], v. 43, n. 2, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/acdfd7>. Acesso em: 29 abr. 2024.

LECOMTE, Jean François. ICRP approach for radiological protection from NORM in industrial processes. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 49, n. 1, p. 84-97, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645320940825>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33327752/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

LITTLE, Mark P. Evidence for dose and dose rate effects in human and animal radiation studies. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 47, n. 3-4, p. 97-112, 2018. DOI 10.1177/0146645318756235. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29652168/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

LIU, Hua; PAN, Ziqiang. NORM situation in non-uranium mining in China. **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 41, n. 3-4, p. 343-351, 2012. DOI 10.1016/j.icrp.2012.06.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0146645312000309>. Acesso em: 29 abr. 2024.

LOY, John. What should a radiation regulator do about naturally occurring radioactive material? **Annals of the ICRP**, Ottawa, v. 44, n. 1, p. 197-201, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645315572298>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0146645315572298>. Acesso em: 29 abr. 2024.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas (ed.). **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990 p.

LUZ, Adão Benvindo; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (ed.). **Tratamento de Minérios 2010**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932 p.

MATTA, Luiz Ernesto Santos de Carvalho. Carvão. In: REIS, Rócio G. dos (ed.). **NORM: Guia Prático**. Rio de Janeiro: IRD, 2016. Cap. 5A-4, p. 21-59.

MAZZILLI, Barbara Paci. Mineração de fosfato e produção de ácido fosfórico. In: REIS, Rócio G. dos (ed.). **NORM: Guia Prático**. Rio de Janeiro: IRD, 2016. Cap. 5A-4, p. 89-98.

MCHUGH, Mary L. The chi-square test of independence. **Biochemia medica**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 143-149, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11613%2FBM.2013.018>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3900058/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

METTLER, Fred A.; UPTON, Arthur C. **Medical effects of ionizing radiation**. 3rd. ed. ill. Philadelphia: Saunders/Elsevier, 2008. 564 p.

MINISTÉRIO DA PREVIDÊNCIA SOCIAL. **Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho**, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/previdencia/pt-br/assuntos/previdencia-social/saude-e-seguranca-do-trabalhador/acidente_trabalho_incapacidade/arquivos/copy2_of_AEAT_2022/aeat-2022. Acesso em 30 jul. 2024.

NRC. **Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2**. Washington, DC: National Academies Press, 2006.

PENFOLD, J. S. S. *et al.* **Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides**. Luxembourg: European Communities, 1999. (Radiation Protection, 107).

PEREIRA, Dulce G.; AFONSO, Anabela; MEDEIROS, Fátima Melo. Overview of Friedman's test and post-hoc analysis. **Communications in Statistics: Simulation and Computation**, Abington, v. 44, n. 10, p. 2636-2653, 2015.

PEREZ-PEREZ, J. *et al.* Radon mitigation applications at the Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). **Universe**, Basel, Suíça, v. 8, n. 2, p. 112, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/universe8020112>. Acesso em: 29 abr. 2024.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SÁ-SILVA, Jackson Ronie; ALMEIDA, Cristóvão Domingos de; GUINDANI, Joel Felipe. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, Rio Grande, v. 1, n. 1, jul. 2009.

SHARPE, Donald. Chi-square test is statistically significant: Now what? **Practical assessment, research, and evaluation**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 1-10, 2015. Disponível em: <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/1485/galley/1436/view/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

TAUHATA, Luiz *et al.* **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10. rev. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014. 344 p.

TILL, John E.; GROGAN, Helen (ed.). **Radiological risk assessment and environmental analysis**. Nova York: Oxford University Press, 2008.

UNSCEAR. **Sources and effects of ionizing radiation**: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations, 2010. v. I. Disponível em: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html. Acesso em: 29 abr. 2024.

UNSCEAR. **Sources, effects and risks of ionizing radiation**: UNSCEAR 2020/2021 Report. New York: United Nations, 2022. v. IV: Scientific Annex D: Evaluation of Occupational Exposure to Ionizing Radiation. Disponível em: <https://www.un-ilib.org/content/books/9789210010061>. Acesso em: 29 abr. 2024.

WOLBARST, Anthony *et al.* Medical response to a major radiologic emergency: a primer for medical and public health practitioners. **Radiology**, [s. l.], v. 254, n. 3, p. 660-677, mar. 2010. Disponível em: 10.1148/radiol.09090330. Acesso em: 29 abr. 2024.

YU, C. *et al.* **Data collection handbook to support modeling impacts of radioactive material in soil**. Argonne, IL: Environmental Assessment and Information Sciences Division/Argonne National Laboratory, 1993. Disponível em: https://resrad.evs.anl.gov/docs/data_collection_1993.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.