

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

JUAN HENRIQUE RIAL JORDÃO

**ANÁLISE DE DISPERSÃO DA PLUMA RADIOATIVA DECORRENTE DE
INCÊNDIO EM DEPÓSITOS DE REJEITOS: UM ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO
APLICANDO O SOFTWARE HOTSPOT**

Rio de Janeiro

2025

JUAN HENRIQUE RIAL JORDÃO

**ANÁLISE DE DISPERSÃO DA PLUMA RADIOATIVA DECORRENTE DE
INCÊNDIO EM DEPÓSITOS DE REJEITOS: UM ESTUDO DE CASO
HIPOTÉTICO APLICANDO O SOFTWARE HOTSPOT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares.

Orientadores: Prof^ª. D.Sc. Hericka Oliveira Kenup Hernandes.

Prof. D.Sc. Zelmo Rodrigues de Lima.

Rio de Janeiro

2025

JORD Henrique Rial Jordão, Juan

Análise de dispersão da pluma radioativa decorrente de incêndio em depósitos de rejeitos: um estudo de caso hipotético aplicando o software Hotspot / Juan Henrique Rial Jordão. – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2025.

XI, 71f. : il. ; 31 cm.

Orientadores: Hericka Oliveira Kenup Hernandes e Zelmo Rodrigues de Lima

Dissertação (mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2025

1. Segurança nuclear. 2. Dispersão de pluma radioativa. 3. Software HotSpot.

ANÁLISE DE DISPERSÃO DA PLUMA RADIOATIVA DECORRENTE DE INCÊNDIO
EM DEPÓSITOS DE REJEITOS: UM ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO APLICANDO O
SOFTWARE HOTSPOT

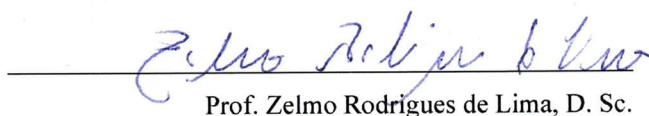
Juan Henrique Rial Jordão

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES

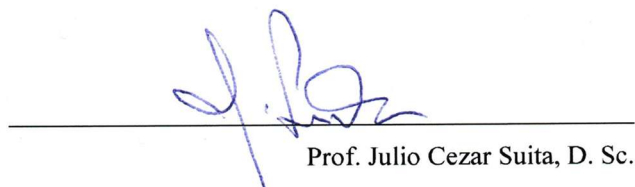
Aprovada por:



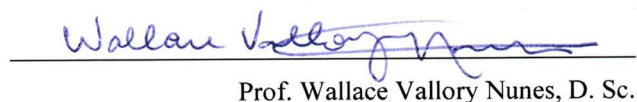
Profa. Hericka Oliveira Kenup Hernandez, D. Sc.



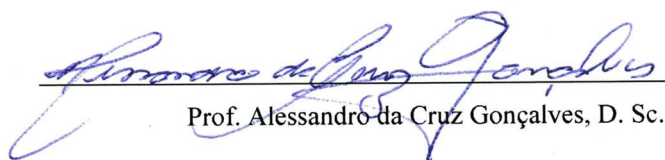
Prof. Zelmo Rodrigues de Lima, D. Sc.



Prof. Julio Cezar Suita, D. Sc.



Prof. Wallace Vallory Nunes, D. Sc.



Prof. Alessandro da Cruz Gonçalves, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2025

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Rosângela, pelo amor incondicional e pelo apoio constante em todos os momentos da minha vida. Sem você, eu não teria alcançado este sonho. Você foi a base de tudo, me proporcionando força e coragem para seguir em frente e continuar a seguir.

Aos meus familiares por acreditarem em mim e por nunca deixarem de me incentivar a buscar mais. Me lembrando da importância de persistir e nunca desistir dos meus sonhos.

Aos meus orientadores, Hericka e Zelmo pela paciência, orientação sábia, e incansável dedicação. Seu conhecimento e experiência foram essenciais para a realização deste trabalho e, mais do que isso, me inspiram a ir além dos meus próprios limites e buscar novos horizontes. Agradecer aos senhores por toda ajuda que foi de grande importância na minha formação.

Aos meus colegas de curso, pela parceria, troca de conhecimentos, e incentivo ao longo dessa jornada. Cada discussão e debate contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico e pessoal. Foi um privilégio compartilhar esse caminho com vocês e as amigas que conquistei durante essa trajetória, obrigado por estarem ao meu lado nos momentos de alegria e nos desafios, sempre com uma palavra de conforto e encorajamento. Vocês fizeram toda a diferença nesta caminhada.

Ao Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), pelo suporte técnico e infraestrutura proporcionados durante meus estudos, que foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para que este trabalho pudesse ser realizado. A todos os professores do curso, pelo empenho em compartilhar conhecimento e pela dedicação em nos guiar pelo caminho do aprendizado.

À Raíle, por sua compreensão, paciência e amor inabalável durante os momentos de ausência e estresse. Seu apoio foi o pilar que me sustentou, e sem você ao meu lado, este caminho teria sido muito mais difícil.

E, acima de tudo, a Deus, pela força, coragem e sabedoria concedidas, permitindo-me conduzir esta jornada com serenidade e determinação. Sinto-me abençoado por todas as oportunidades e desafios que me fizeram crescer.

RESUMO

Este estudo analisou a dispersão de plumas radioativas em cenários de incêndio em depósitos de rejeitos radioativos, utilizando o *software* HotSpot para simular diferentes condições atmosféricas (classes de estabilidade de Pasquill-Gifford) e tipos de terreno (urbano e rural). A Dose Efetiva Total (TED) e as curvas de isodose foram avaliadas em cada cenário com base nos limites estabelecidos pela CNEN (2014). Os resultados mostraram que classes instáveis (A, B e C), com sol alto e ventos fortes, promovem uma dispersão mais ampla, enquanto classes estáveis (D, E e F), com ventos fracos e condições noturnas, concentram radionuclídeos próximos à fonte. O terreno urbano, devido à irregularidade do solo e às estruturas físicas, atenuou a dispersão, resultando em áreas de isodose menores, mas a maior densidade populacional aumenta a exposição a riscos. A realização deste estudo reforça o compromisso do setor nuclear com a segurança e a transparência, ao utilizar simulações computacionais para antecipar cenários de acidentes e aprimorar a mitigação de riscos. Essa abordagem proativa evidencia o comprometimento com a proteção da saúde pública e do meio ambiente, consolidando a energia nuclear como uma opção responsável e sustentável. Os resultados contribuem para o aprimoramento das práticas de gestão de rejeitos e para o fortalecimento de políticas de segurança, oferecendo subsídios para planos de emergência e estratégias de mitigação. Espera-se que as conclusões orientem decisões de autoridades e gestores, promovendo um manejo mais seguro e sustentável de resíduos radioativos.

Palavras-chave: Segurança nuclear. Dispersão de pluma radioativa. Software HotSpot

ABSTRACT

This study analyzed the dispersion of radioactive plumes in fire scenarios at radioactive waste depositories, using the HotSpot software to simulate different atmospheric conditions (Pasquill-Gifford stability classes) and terrain types (urban and rural). The Total Effective Dose (TED) and isodose curves were evaluated in each scenario based on the limits established by the CNEN (2014). The results showed that unstable classes (A, B, and C), with high solar radiation and strong winds, promote widespread dispersion, while stable classes (D, E, and F), with weak winds and nighttime conditions, concentrate radionuclides closer to the source. Urban terrain, due to ground roughness and physical structures, attenuated dispersion, resulting in smaller isodose areas, but higher population density increases exposure to risks. The completion of this study reinforces the nuclear sector's commitment to safety and transparency by using computational simulations to anticipate accident scenarios and improve risk mitigation. This proactive approach demonstrates a commitment to public health and environmental protection, solidifying nuclear energy as a responsible and sustainable option. The results contribute to the improvement of waste management practices and the strengthening of safety policies, providing support for emergency plans and mitigation strategies. It is expected that the conclusions will guide decisions by authorities and managers, promoting safer and more sustainable management of radioactive waste.

Keywords: Nuclear safety. Radioactive plume dispersion. HotSpot software.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1- Interação da radiação com a matéria, incluindo tecido biológico. Adaptado de (UNSCEAR, 2016).....	10
Figura 2.8.1- Mapa dos traços de radioatividade na área dos Urais Orientais, contaminada pelo desastre de Kyshtym. Fonte: FAKTOPEDIA, 2021.	29
Figura 2.8.2- Estimativa da pluma de plutônio (Pu-239) do incêndio em Rocky Flats. Fonte: K-spar Inc., 2025.	31
Figura 3.3.1 - Tela inicial do HotSpot com as opções de modelos de dispersão atmosféricas pré-configuradas e opção General Fire assinalada.....	44
Figura 3.3.2- Tela do HotSpot para configuração os dados do termo de fonte e informações sobre o incêndio.	45
Figura 3.3.3- Tela do HotSpot para configuração dos dados de velocidade do vento em 10 metros e as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford.....	46
Figura 3.3.4- Tela do HotSpot para configurar a altura do receptor e as vinte posições em relação ao ponto de liberação da pluma.	47
Figura 3.3.5- Tela do HotSpot para configuração de parâmetros, incluindo o valor para isodose externa...	47
Figura 3.3.6- Tela do HotSpot para configuração dos arquivos gerados pelos dados de saída.....	48
Figura 4.1.1- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade A.....	50
Figura 4.1.2- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade B.....	51
Figura 4.1.3- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade C.....	52
Figura 4.1.4- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade D.....	53
Figura 4.1.5- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade E.	54
Figura 4.1.6- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade F.	55
Figura 4.2.1- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade A, terreno urbano.	57
Figura 4.2.2- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade A, terreno rural.....	58
Figura 4.2.3- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade B, terreno urbano.	58
Figura 4.2.4- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade B, terreno rural.....	59
Figura 4.2.5- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade C, terreno urbano.	59
Figura 4.2.6- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade C, terreno rural.....	60
Figura 4.2.7- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade D, terreno urbano.	60
Figura 4.2.8- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade D, terreno rural.....	61
Figura 4.2.9- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade E, terreno urbano.....	61
Figura 4.2.10- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade E, terreno rural.	62
Figura 4.2.11- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade F, terreno urbano.....	62
Figura 4.2.12- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade F, terreno rural.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.4.1- Limites de dose anual para IOE e Público Geral. Fonte: (CNEN NN 3.01, 2024).....	15
Tabela 3.1.1- Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno padrão (HOMANN, 2014).....	41
Tabela 3.1.2- Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno urbano (HOMANN, 2014).....	41
Tabela 3.2.1- Inventário de radionuclídeos. (adaptado de Domingos, 2018)	43
Tabela 3.3.1- Condições meteorológicas utilizadas	45
Tabela 4.1.1- Classe de Estabilidade A - TED.....	50
Tabela 4.1.2- Classe de Estabilidade B - TED.....	51
Tabela 4.1.3- Classe de Estabilidade C - TED.....	52
Tabela 4.1.4- Classe de Estabilidade D - TED.....	53
Tabela 4.1.5- Classe de Estabilidade E - TED	54
Tabela 4.1.6- Classe de Estabilidade F - TED	55
Tabela 4.1.7- Consolidação dos resultados para simulação da TED para dispersão de pluma radioativa em seis classes de estabilidade meteorológicas, em terreno rural e urbano.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DNA	Ácido desoxirribonucleico
FGR	<i>Federal Guidance Report</i>
ICPR	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
INES	Escala Internacional de Eventos Nucleares
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
LLNL	<i>Lawrence Livermore National Laboratory</i>
MCNP	<i>Monte Carlo N-Particle Transport Code</i>
NBR	Norma Brasileira
NE	Norma Nuclear
NN	Norma Experimental
RAN	Rejeitos de Alto Nível de Radiação
RBMN	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação
RI	Rejeitos Isentos
RNA	Ácido ribonucleico
RVMC	Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta
UNSCEAR	Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USA	Estados Unidos da América
WIPP	Planta Piloto de Isolamento de Resíduos

LISTA DE SÍMBOLOS

^4He	Elemento Hélio-4
A	Adenina
C	Citosina
$C(x, y, z)$	Concentração atmosférica integrada no tempo em um ponto (x, y, z)
Ci	Curies
cm ²	Centímetros quadrados
CO ₂	Dióxido de carbono
Cs-137	Elemento Césio-137
DF(x)	Fator de depleção da pluma
dm	unidade de massa
D _T	Dose absorvida
de	energia absorvida
D _{T,R}	Dose média absorvida sobre o tecido ou órgão T
E	Dose Efetiva
eV	Eletrón-volt
G	Guanina
G0	Fase do ciclo celular, sem divisão celular
G1	Fase do ciclo celular no qual a célula aumenta seu material enzimático
G2	Fase final do ciclo celular no qual a célula duplica organelas
Gy	Gray
H	Altura efetiva de liberação
H _T	Dose Equivalente
I-131	Elemento Iodo-131
J/kg	Joule por quilograma
Km	Quilômetro
Km ²	Quilômetro Quadrado
kW/m ³	Quilowatt por metro cúbico
L	Altura da camada de inversão
m	Metro
m/s	Metros por segundo
mSv	Milisievert

n	Nêutron
Q	Atividade da fonte
R	Tipo de radiação ou Energia da Radiação Incidente
S	Fase do ciclo celular no qual a célula replica o DNA
Sv	Sievert
T	Timina
T	Tecido
Th-232	Elemento Tório-232
U-235	Elemento Urânio-235
U-238	Elemento Urânio-238
V	Volt
WR	fator de ponderação da radiação
x	Distância na direção do vento
y	Distância na direção perpendicular ao vento
Z	Número atômico
z	Distância no eixo vertical
α	Partícula alfa
β	Partícula beta
β^-	Partícula beta negativa
β^+	Partícula beta positiva ou pósitron
γ	Radiação gama
δy	Desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção horizontal
δz	Desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical
λ	Constante de decaimento radioativo
μ	Média da velocidade do vento na altura efetiva de liberação
ν	Neutrino

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
1.2.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
 2. REFERENCIALTEÓRICO.....	5
2.1.RADIAÇÃO NUCLEAR	5
2.1.1. Tipos de radiações	7
2.2.EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES	10
2.2.1. A célula	10
2.2.2. Molécula de DNA	11
2.2.3. Ciclo celular.....	11
2.3.INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM O TECIDO BIOLÓGICO.....	12
2.4.PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	13
2.4.1. Limites de dose individual.....	14
2.4.2. Grandezas e Unidades Dosimétricas	16
2.4.2.1.Dose Absorvida.....	16
2.4.2.2.Dose Equivalente.....	16
2.4.2.3.Dose Efetiva.....	17
2.5.EMPREGO DAS RADIAÇÕES IONIZANTES	18
2.6.GERENCIAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS.....	20
2.6.1. Contexto e Importância da Aplicação das Normas da CNEN no Gerenciamento de Rejeitos Radioativos	21
2.6.2. Análise de Segurança e Dependência Normativa.....	22
2.6.3. Depósito de rejeitos radioativos	23
2.7.INCÊNDIOS EM INSTALAÇÕES NUCLEARES E RADIATIVAS.....	26
2.8.ANÁLISE DE EVENTOS ENVOLVENDO INCÊNDIO EM DEPÓSITOS DE REJEITOS.....	27
2.8.1. Desastre de Kyshtym, Chelyabinsk-URSS em 1957	28
2.8.2. Incêndio Rocky Flats, Colorado-USA em 1969	30
2.8.3. Incêndio de WIPP, Novo México-USA em 2014	31

2.9.PRINCÍPIOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE SEGURANÇA DE DEPÓSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS	32
2.9.1. Dispersão atmosférica	34
2.9.2. Software HotSpot	36
2.10.APLICAÇÕES ENVOLVENDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO E ANÁLISE DE INCÊNDIO EM DEPÓSITO DE REJEITOS	37
3. METODOLOGIA.....	40
3.1.APLICAÇÃO DO MODELO GAUSSIANO COM O SOFTWARE HOTSPOT	40
3.2.TERMO DE FONTE	42
3.3.CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DE ENTRADA DO HOTSPOT	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1.DOSE EFETIVA TOTAL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	49
4.2.CURVAS DE ISODOSES.....	57
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
5.1.CONCLUSÃO	64
5.2.RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário global marcado pela crescente demanda por energia e pelo avanço das atividades nucleares, a segurança no manejo de rejeitos radioativos emerge como uma prioridade incontestável. A gestão adequada desses resíduos, provenientes tanto de operações industriais quanto de usinas nucleares, é fundamental para mitigar riscos associados à liberação acidental de material radioativo.

Dentre os diversos cenários de risco, os incêndios em depósitos de rejeitos radioativos destacam-se como eventos críticos, capazes de desencadear a dispersão de materiais radioativos na atmosfera. Tais eventos não apenas representam uma ameaça direta à saúde pública, mas também podem causar impactos ambientais de longo prazo, afetando ecossistemas e comunidades em áreas urbanas e rurais.

Nesse contexto, o cumprimento das normas e diretrizes aplicáveis ao gerenciamento de rejeitos radioativos, à segurança nuclear e ao licenciamento de instalações torna-se um parâmetro essencial para orientar ações preventivas, garantindo a conformidade com padrões internacionais e nacionais de proteção radiológica e ambiental.

A simulação de incêndios em depósitos de rejeitos radioativos e a análise da dispersão de plumas radioativas constituem, portanto, elementos essenciais para a compreensão e a prevenção de desastres nucleares, permitindo não apenas avaliar a dinâmica da dispersão de radionuclídeos, mas também prever cenários de risco, subsidiar a elaboração de planos de emergência e aprimorar as estratégias de mitigação dos impactos associados.

O uso de modelos computacionais avançados torna-se indispensável, uma vez que possibilita a replicação precisa de variáveis complexas, como condições atmosféricas, propriedades dos materiais envolvidos e características geográficas do local.

O presente trabalho propõe-se a analisar a segurança em depósitos de rejeitos radioativos, com foco na simulação de um cenário de incêndio e na avaliação da dispersão da pluma radioativa em ambientes urbanos e rurais. Para alcançar esse objetivo, será utilizado o *software* HotSpot, uma ferramenta amplamente reconhecida na modelagem de dispersão de radionuclídeos. A metodologia adotada incluirá a simulação de diferentes parâmetros, como direção e velocidade do vento, estabilidade atmosférica e características do material radioativo, visando a obtenção de cenários realistas e robustos.

Além da análise da dispersão da pluma, este estudo apontará os potenciais impactos na saúde da população exposta e no meio ambiente com o intuito de compreender os mecanismos de contaminação e seus efeitos a médio e longo prazos.

Ao abordar essa temática, este trabalho visa contribuir para o avanço das boas práticas de gestão de rejeitos radioativos e para o fortalecimento das políticas de segurança nuclear. A compreensão detalhada dos processos de dispersão e dos impactos associados é fundamental para a elaboração de medidas preventivas e de resposta a emergências, garantindo a proteção da população e a preservação do meio ambiente. Dessa forma, espera-se que os resultados obtidos possam subsidiar a tomada de decisões por parte de autoridades e gestores, promovendo um manejo mais seguro e sustentável de resíduos radioativos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Utilizar uma ferramenta computacional para simular cenários de incêndio em depósitos de rejeitos radioativos, com o intuito de prever a dispersão de plumas radioativas e analisar os riscos potenciais associados à saúde pública e ao meio ambiente.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Aplicar o *software* HotSpot para simulação de incêndios em depósitos de rejeitos radioativos, considerando variáveis como a composição dos materiais, condições atmosféricas e localização do depósito;
- Comparar cenários de simulação de dispersão de plumas radioativas em dois contextos distintos: uma cidade do interior e um centro urbano, com o intuito de identificar a vulnerabilidade de cada cenário e subsidiar estratégias de gestão de riscos adaptadas às particularidades de cada contexto;
- Identificar os principais fatores que influenciam a dispersão de plumas radioativas, tais como direção e velocidade do vento, temperatura, umidade e estabilidade atmosférica, a fim de compreender a dinâmica da dispersão e seus impactos potenciais, para assim contribuir na elaboração de estratégias de prevenção e resposta a emergências.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, que buscam apresentar de forma clara e estruturada o desenvolvimento do trabalho, desde os fundamentos teóricos até a análise dos resultados obtidos.

No primeiro capítulo, são apresentados os objetivos do trabalho, divididos em objetivo geral e específicos, que norteiam a pesquisa. Além disso, é detalhada a estrutura da dissertação, oferecendo ao leitor uma visão geral do que será discutido ao longo do texto. A introdução contextualiza a importância do tema, destacando a relevância da segurança radiológica e da simulação computacional na análise de riscos associados a depósitos de rejeitos radioativos.

O segundo capítulo aborda os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa. Inicia-se com uma discussão sobre radiação nuclear, explorando os tipos de radiações e seus efeitos biológicos, com foco na interação da radiação com o tecido biológico, incluindo aspectos como a célula, a molécula de DNA e o ciclo celular. Em seguida, são discutidos os princípios da proteção radiológica, com ênfase nos limites de dose individual e nas grandezas e unidades dosimétricas, como dose absorvida, dose equivalente e dose efetiva.

O capítulo também aborda o emprego das radiações ionizantes e o gerenciamento de rejeitos radioativos, destacando a importância das normas da CNEN e a análise de segurança em depósitos de rejeitos. Além disso, são apresentados casos históricos de incêndios em instalações nucleares, como os desastres de Kyshtym, Rocky Flats e WIPP, que servem como base para a compreensão dos riscos envolvidos.

Por fim, são discutidos os princípios de simulação computacional aplicados à análise de segurança, com foco na dispersão atmosférica e no uso do software HotSpot, além de aplicações práticas dessa ferramenta na previsão e análise de incêndios em depósitos de rejeitos.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada na pesquisa, detalhando a aplicação do modelo gaussiano com o software HotSpot. São explicados os procedimentos para a definição do termo de fonte, a configuração do cenário de exposição e os parâmetros de entrada utilizados no software. Este capítulo fornece as bases técnicas para a compreensão das simulações realizadas e dos resultados obtidos.

No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas. A análise inclui a dose efetiva total em função da distância e a geração de curvas de isodoses, que permitem avaliar a dispersão de materiais radioativos e seus possíveis impactos. Os resultados são interpretados à luz do referencial teórico, destacando suas implicações para

a segurança radiológica e o gerenciamento de rejeitos radioativos.

O quinto e último capítulo traz as conclusões do trabalho, sintetizando os principais achados e sua relevância para o campo de estudo. Além disso, são propostas recomendações para pesquisas futuras, sugerindo aprimoramentos metodológicos e a inclusão de novas variáveis, como a análise de cenários meteorológicos específicos e a validação dos dados simulados com base em casos reais. Essas recomendações visam ampliar a aplicabilidade e a precisão dos modelos desenvolvidos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. RADIAÇÃO NUCLEAR

Os seres humanos estão continuamente expostos à radiação de origem natural provenientes do meio ambiente no qual se insere, essas fontes têm como origem a radiação cósmica, radiação emitida pela crosta terrestre, radiação emitida por materiais de construção, por radionuclídeos inalados, e radionuclídeos incorporados por ingestão. Principalmente depois do avanço e desenvolvimento tecnológico do setor nuclear as pessoas ficaram expostas também às radiações de fontes artificiais no meio ambiente. Estas radiações a que se está sujeito continuamente sejam naturais ou artificiais, são chamadas de radiação de fundo, *Background* (RAMACHANDRAN, 2011).

A utilização das radiações ionizantes, empregada na saúde, na indústria, na pesquisa ou na geração de energia elétrica, consegue proporcionar grandes benefícios e desenvolvimentos para a humanidade, existem riscos associados à sua utilização tanto para o ser humano quanto para o meio ambiente. Os efeitos causados pela interação da radiação com tecidos biológicos podem variar de acordo com o tempo de exposição, a dose de radiação e a distância da exposição do indivíduo. Tal interação pode causar efeitos biológicos que podem resultar em danos na estrutura celular, bem como mutações genéticas, modificações ou morte celular.

A proteção radiológica integra um conjunto de normas que devem ser conhecidas, principalmente por parte das pessoas que estão envolvidas com as radiações ionizantes, seja como o indivíduo ocupacionalmente exposto, que exerce atividades que envolvem a radiação, ou como o indivíduo público, que pode ser afetado pelas emissões de radiação, é crucial entender os riscos associados e adotar as medidas de proteção adequadas para garantir a saúde e a segurança de todos.

Conhecer suas grandezas e unidades, a forma como a radiação interage com a matéria, os princípios básicos, como justificação, limitação de dose e otimização, os acessórios e equipamentos necessários com o objetivo de monitorar a dose recebida por um indivíduo é indispensável para a formação dos que estão envolvidos na área radiológica.

O conceito de radiação nuclear pode ser explicado pela citação:

Radiação nuclear é o nome dado às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, para atingir a estabilidade. Devido à intensidade das forças atuantes dentro do núcleo atômico, as radiações nucleares são altamente energéticas quando comparadas com as radiações emitidas pelas camadas eletrônicas. (TAUHATA *et al.*, 2014, p.19).

Os elementos radioativos de interesse que tem excesso de energia a ser liberada através do seu decaimento são chamados de radioisótopos, estes são átomos do mesmo elemento químico possuindo o mesmo número de prótons (número atômico Z) mas com o número de nêutrons diferentes, consequentemente possuindo o número de massa diferente, esse estado onde os elementos que buscam a estabilidade liberam a radiação pode ser um processo muito rápido ou demorado podendo variar de milésimos de segundos a bilhões de anos na tentativa de encontrar a sua estabilidade atômica (XAVIER *et al.*, 2015).

Alguns elementos radioativos encontrados na natureza possuem meias-vidas extremamente longas, como é o caso do Urânio-235 (U-235), Urânio-238 (U-238) e Tório-232 (Th-232), que integram as séries radioativas naturais. A abundância relativa desses elementos na natureza está diretamente relacionada ao tempo de meia-vida de cada um. Por exemplo, o U-235, com uma meia-vida de 713 milhões de anos, é encontrado em menor proporção em relação ao U-238, cuja meia-vida é de 4,5 bilhões de anos. Isso ocorre porque o U-235 decai mais rapidamente, sendo consumido em maior escala ao longo do tempo geológico.

Além dos radioisótopos naturais, é possível produzir radioisótopos artificiais por meio de reatores nucleares e aceleradores de partículas. Esses processos utilizam isótopos estáveis como matéria-prima, transformando-os em elementos radioativos que não são encontrados naturalmente ou que existem em quantidades insignificantes. A partir dessas técnicas, foram desenvolvidas as séries radioativas artificiais, ampliando as possibilidades de aplicação dos radioisótopos em áreas como medicina, indústria e pesquisa científica (MODERN PHYSICS, 2025).

À medida que esses elementos instáveis buscam a estabilidade ocorre também a liberação de energia, essa energia da radiação vem da força de ligação do núcleo e geralmente sendo expressa em elétron-volt (eV).

Um elétron-volt (eV) corresponde à energia cinética adquirida por um elétron ao ser acelerado por uma diferença de potencial elétrico de 1 volt (RAMACHANDRAN, 2011).

Durante o processo de decaimento radioativo, os núcleos instáveis de átomos podem se transmutar em elementos diferentes, passando por uma série de transformações até atingirem um estado estável. Esse fenômeno é a base de aplicações importantes, como a produção de energia em usinas termonucleares e o uso de radioisótopos na medicina nuclear.

A radiação emitida durante esses processos, juntamente com os raios X, é classificada como radiação ionizante. Isso significa que ela possui energia suficiente para interagir com a matéria, transferindo parte de sua energia e causando a ionização de átomos. No caso do corpo humano, essa interação pode resultar na ejeção de elétrons dos átomos, formando íons. Quando a radiação ionizante interage com tecidos vivos, pode causar danos à estrutura celular, afetando moléculas essenciais, como o DNA, e levando a possíveis efeitos biológicos (OKUNO, 2013).

2.1.1. Tipos de radiações

Os principais tipos de radiação são as partículas alfa (α), partículas beta (β), raios gama (γ) e nêutrons (n). Essas radiações são caracterizadas por transportar energia, mas diferem entre si em aspectos como massa, origem, quantidade de energia e capacidade de penetração em materiais, incluindo tecidos humanos. Cada tipo de radiação possui propriedades únicas que determinam seus efeitos e aplicações.

Uma das formas de um núcleo atômico instável liberar o excesso de energia é por meio da emissão de partículas alfa, que consistem em um grupo de duas partículas positivas (prótons) e dois nêutrons, juntamente com a energia associada a elas. Essas partículas, também conhecidas como núcleos de Hélio-4 (^4He), possuem a mesma estrutura de um átomo de Hélio, gás nobre conhecido por sua baixa reatividade química. Durante o decaimento alfa, o núcleo original "perde" dois prótons e dois nêutrons, resultando em um novo núcleo com quatro unidades de massa atômica a menos. Esse processo é mais comum em núcleos pesados, onde o grande número de prótons e nêutrons favorece a instabilidade nuclear (TAUHATA *et al.*, 2014).

As partículas alfa são altamente energéticas, mas, devido ao seu grande tamanho e carga positiva, possuem uma capacidade limitada de penetração em materiais. Elas são facilmente bloqueadas por uma simples folha de papel ou pela camada externa da pele humana. No entanto, representam um risco significativo à saúde quando ingeridas, inaladas ou injetadas, pois sua alta energia e capacidade de ionização podem causar danos celulares e ao DNA.

O entendimento das partículas alfa é crucial devido ao seu alto poder de ionização e ao impacto que podem causar nos tecidos biológicos. Quando presentes no interior do corpo

humano, as partículas alfa depositam sua energia em um curto espaço, aumentando a probabilidade de interações com células e moléculas de DNA. Essa interação pode levar a danos celulares significativos, mutações genéticas e, conseqüentemente, ao aumento do risco de desenvolvimento de câncer.

Outro mecanismo de estabilização nuclear ocorre em núcleos que apresentam um excesso de nêutrons em relação ao número de prótons. Nesses casos, a estabilidade é alcançada por meio da emissão de partículas beta negativas (β^-), que consistem em elétrons de alta energia. Esse processo ocorre quando um nêutron se transforma em um próton, liberando um elétron e um antineutrino. Por outro lado, quando há um excesso de prótons, o núcleo pode emitir partículas beta positivas (β^+), também conhecidas como pósitrons, que são partículas com a mesma massa do elétron, mas com carga positiva. Essa emissão resulta da conversão de um próton em um nêutron, acompanhada pela liberação de um neutrino (ν).

A radiação beta é, portanto, composta por partículas emitidas durante a transformação de nêutrons em prótons (β^-) ou de prótons em nêutrons (β^+). Essas partículas possuem maior capacidade de penetração em materiais em comparação às partículas alfa, embora ainda sejam menos penetrantes que os raios gama. Ao interagir com um meio material, as partículas beta perdem energia gradualmente, ionizando os átomos ao longo de sua trajetória. Essa ionização ocorre devido à alta velocidade das partículas beta, que podem ejetar elétrons dos átomos com os quais colidem (TAUHATA *et al.*, 2014).

A blindagem contra partículas beta pode ser realizada com materiais de baixa densidade, como alumínio ou plástico, que são eficazes em absorver sua energia e reduzir sua penetração. No entanto, devido à sua capacidade de ionização, a exposição à radiação beta pode causar danos aos tecidos biológicos, especialmente se as partículas entrarem em contato direto com o corpo humano.

Diferentemente das radiações alfa e beta, que são constituídas por partículas, a radiação gama (γ) é formada por ondas eletromagnéticas de alta energia, emitidas por núcleos atômicos instáveis imediatamente após a emissão de uma partícula alfa ou beta. Essa radiação é resultante da reorganização do núcleo para um estado de menor energia, liberando fótons altamente energéticos (XAVIER *et al.*, 2015).

As radiações gama e os raios-X são ambas ondas eletromagnéticas de alta energia, mas diferem em sua origem. Enquanto os raios gama são emitidos pelo núcleo atômico durante processos de decaimento radioativo, os raios-X são produzidos por transições de elétrons nas camadas eletrônicas dos átomos. Ambas as radiações são altamente penetrantes e energéticas,

capazes de atravessar materiais densos e interagir com tecidos humanos. Essa interação pode resultar em ionização, causando danos celulares, mutações genéticas e aumentando o risco de desenvolvimento de câncer.

Devido ao seu alto poder de penetração e aos riscos associados à exposição, a blindagem contra radiação gama e raios-X requer materiais com elevado número atômico, como o chumbo, que é amplamente utilizado em barreiras de proteção. Além disso, a exposição a essas radiações é uma preocupação significativa para profissionais que lidam com materiais radioativos. Para garantir a segurança, é essencial o uso de dosímetros individuais, dispositivos que monitoram a dose de radiação recebida pelo Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE). Esses instrumentos são fundamentais para controlar a exposição e garantir que os limites de dose estabelecidos pelas normas de proteção radiológica sejam respeitados (CNEN NN 3.02, 2024).

O nêutron é uma partícula subatômica que, juntamente com os prótons, compõe o núcleo atômico. Diferentemente dos prótons, os nêutrons não possuem carga elétrica, desempenhando um papel fundamental na estabilidade dos núcleos atômicos. Durante o processo de fissão nuclear, que ocorre no interior de reatores nucleares, grandes quantidades de nêutrons são liberadas, tornando-se essenciais para a sustentação da reação em cadeia.

Os nêutrons podem ser classificados em dois tipos principais, de acordo com sua energia: nêutrons rápidos, que possuem alta energia, e nêutrons térmicos, que apresentam menor energia. Os nêutrons térmicos são particularmente eficientes em induzir a fissão nuclear, sendo amplamente utilizados em reatores nucleares para manter a reação em cadeia de forma controlada (TAUHATA *et al.*, 2014).

Devido à sua ausência de carga elétrica, os nêutrons interagem de forma limitada com a matéria, o que lhes permite percorrer longas distâncias antes de serem absorvidos ou sofrerem espalhamento. Quando incidem sobre um material, os nêutrons podem ser espalhados, absorvidos ou até mesmo induzir reações nucleares com os núcleos do meio. Essa característica torna os nêutrons uma forma de radiação altamente penetrante, exigindo estratégias específicas para sua blindagem.

Os materiais mais utilizados para a blindagem de nêutrons são aqueles com baixo número atômico (Z), como água leve, água pesada, parafina borada, grafite e concreto. Esses materiais são eficazes na redução da energia dos nêutrons por meio de processos de espalhamento e absorção, minimizando assim os riscos associados à exposição a essa radiação (LOPES, 2023).

Logo, verifica-se como o estudo dos diferentes tipos de radiação é fundamental para a compreensão dos processos de decaimento radioativo e dos mecanismos de dispersão de radioisótopos em cenários de incêndio em depósitos de rejeitos. Isso porque, cada tipo de radiação possui características específicas, como poder de penetração, Figura 3.1.1, capacidade de ionização e interação com a matéria, que influenciam diretamente os riscos associados à liberação de material radioativo.

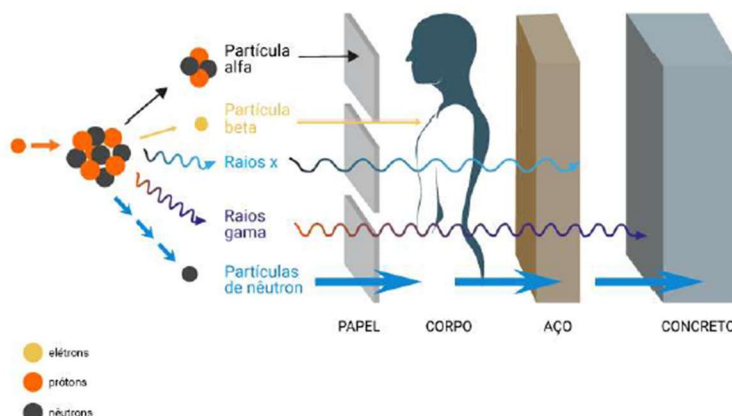


Figura 2.1.1 - Interação da radiação com a matéria, incluindo tecido biológico. Adaptado de (UNSCEAR, 2016).

2.2. EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

2.2.1. A célula

A célula é reconhecida como a unidade morfológica e fisiológica fundamental dos seres vivos (ALBERTS *et al.*, 2022). Elas são constituídas por um sistema de membranas de natureza lipoproteica, cuja função principal é manter a individualidade celular e sua compartimentação, equilibrar os eletrólitos, controlar a entrada e saída de substâncias e, consequentemente, regular suas interações com o meio ambiente. O citoplasma, composto principalmente por água e proteínas, preenche a célula e abriga as diversas organelas responsáveis pelas principais atividades metabólicas (LODISH *et al.*, 2021).

Nas células eucarióticas, o núcleo celular, imerso no citoplasma, contém o material genético que regula todas as atividades celulares. O núcleo é composto por três componentes principais: nucleoplasma, cromossomos e nucléolos (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2020). Os cromossomos são formados por ácido desoxirribonucleico (DNA) e proteínas, e nas células somáticas, apresentam-se como finos filamentos. Já os nucléolos são pequenos corpos que

contêm nucleoproteínas, predominantemente na forma de ácido ribonucleico (RNA), e o nucleoplasma é constituído por proteínas e sais (ALBERTS *et al.*, 2022).

2.2.2. Molécula de DNA

A molécula de DNA é constituída por subunidades denominadas nucleotídeos. Cada nucleotídeo é composto por um açúcar (desoxirribose), um grupo fosfato e uma das quatro bases nitrogenadas: adenina (A), timina (T), guanina (G) ou citosina (C). As bases C e T, que possuem apenas um anel, são classificadas como pirimidinas, enquanto as bases A e G, que possuem dois anéis, são denominadas purinas (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2020).

Os nucleotídeos do DNA organizam-se em cadeias unidas por ligações covalentes que se formam entre o açúcar desoxirribose de um nucleotídeo e o grupo fosfato do próximo. Esse arranjo resulta em uma cadeia alternada de grupos fosfato e açúcar desoxirribose, formando o DNA. Essa estrutura do DNA é representada por uma hélice de dupla fita. Os esqueletos açúcar-fosfato das fitas de DNA constituem o exterior da hélice, enquanto as bases nitrogenadas estão localizadas no interior, formando pares ligados por ligações de hidrogênio que mantêm as fitas de DNA unidas (ALBERTS *et al.*, 2022).

2.2.3. Ciclo celular

O ciclo celular é um processo fundamental para o crescimento, desenvolvimento e regeneração dos organismos, sendo dividido em duas fases principais: a interfase e a mitose. A interfase, que ocupa aproximadamente 90% do tempo total do ciclo celular, é subdividida em quatro etapas: G0, G1, S e G2. Durante essa fase, a célula cresce, adquire nutrientes e duplica seu material genético.

Na interfase a célula se prepara para a divisão. A fase G0 é uma etapa distinta, em que a célula permanece em um estado sem se dividir, devido à ausência de estímulos ou fatores de crescimento adequados (COOPER; HAUSMAN, 2023). Na fase G1, a célula aumenta seu tamanho, replica organelas e sintetiza proteínas e enzimas essenciais para seu funcionamento. A fase S, por sua vez, é marcada pela replicação do DNA nuclear, garantindo que cada célula-filha receba uma cópia idêntica do material genético. Por fim, na fase G2, a célula conclui os preparativos para a mitose, duplicando organelas e estruturas necessárias para a divisão celular (PIERCE, 2020).

Na sequência, ocorre a mitose, que é o processo de divisão celular que resulta na formação de duas células-filhas geneticamente idênticas à célula-mãe, essencial para o crescimento e a regeneração dos tecidos. Essa etapa pode ser subdividida em prófase, metáfase, anáfase, telófase e citocinese (COOPER; HAUSMAN, 2023).

Na Prófase, os cromossomos condensam-se e tornam-se visíveis ao microscópio. O nucléolo desaparece, e a membrana nuclear começa a se desintegrar. Os centríolos migram para polos opostos da célula, formando o fuso mitótico, que se liga aos cromossomos através dos cinetócoros, estruturas localizadas no centrômero.

Já na Metáfase, os cromossomos alinham-se no plano equatorial da célula, formando a placa metafásica. Esse alinhamento é crucial para garantir a distribuição equitativa dos cromossomos às células-filhas.

Em seguida, tem-se a Anáfase, na qual as cromátides-irmãs, que são estruturas idênticas formadas durante a replicação do DNA e que ocorre na fase *S* do ciclo celular, são separadas e puxadas para polos opostos da célula.

Por fim, na Telófase, os cromossomos chegam aos polos celulares e começam a se descondensar. A membrana nuclear reforma-se ao redor de cada conjunto de cromossomos, e o nucléolo reaparece, marcando o fim da mitose. Após a telófase, ocorre a citocinese, processo em que o citoplasma é dividido, resultando na formação de duas células-filhas completas e geneticamente idênticas (PIERCE, 2020).

2.3. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM O TECIDO BIOLÓGICO

O efeito biológico da radiação está diretamente relacionado à sua capacidade de ionizar a matéria com a qual interage, o que significa a remoção de elétrons de átomos e moléculas, formando íons e radicais livres altamente reativos. Diferentes tipos de radiação apresentam diferentes capacidades de ionização, seguindo a ordem decrescente: partículas alfa (α), partículas beta (β) e raios gama (γ) (TURNER, 2016). A interação da radiação com biomoléculas essenciais, como proteínas, lipídios e, principalmente, ácidos nucleicos, pode gerar danos estruturais e funcionais significativos. A formação de radicais livres a partir da radiólise da água celular, por exemplo, pode amplificar os danos ao DNA, promovendo mutações e lesões irreversíveis no ciclo celular (HALL; GIACCIA, 2019).

A exposição à radiação ionizante pode comprometer severamente o ciclo celular, causando danos ao DNA, mutações genéticas e até mesmo a morte celular. Durante a fase *S* da interfase, já mencionada no tópico anterior, a radiação pode induzir quebras na dupla hélice,

dificultando a correta duplicação do material genético e aumentando significativamente o risco de mutações. Se os mecanismos de reparo celular falharem, essas alterações podem levar à proliferação descontrolada de células, favorecendo o desenvolvimento de neoplasias, ou à indução do apoptose, morte celular, comprometendo a capacidade de regeneração tecidual (TUBIANA *et al.*, 2009).

Os efeitos da exposição à radiação podem ser divididos em determinísticos e estocásticos. Os efeitos determinísticos ocorrem quando a dose de radiação excede um determinado limiar, resultando em danos celulares previsíveis, como queimaduras e necrose tecidual. Já os efeitos estocásticos não apresentam uma correspondência direta de causa e efeito, podendo se manifestar anos após a exposição, e eventualmente podem culminar em mutações genéticas ou neoplasias (ICRP, 2007).

A proteção radiológica é, portanto, essencial para minimizar tais efeitos, sendo baseada em princípios fundamentais como justificação, otimização e limitação de dose, conforme preconizado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

Para garantir a segurança dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e do público em geral, normas rigorosas de proteção radiológica estabelecem limites de dose e diretrizes para minimizar a exposição. O monitoramento da dose absorvida e o uso de barreiras físicas, como blindagens adequadas, são estratégias fundamentais para reduzir os riscos associados à exposição ocupacional e ambiental (MARTIN; HARBISON, 2018).

2.4. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) é uma organização internacional independente, fundada em 1928, que estabelece diretrizes e recomendações para a proteção contra radiações ionizantes. Seu principal objetivo é garantir a segurança e a saúde humana, bem como a proteção do meio ambiente, em atividades que envolvam exposição à radiação ionizante, buscando equilibrar os benefícios das aplicações da radiação com os riscos associados à exposição, assegurando que os níveis de radiação sejam mantidos dentro de limites seguros (ICRP, 2007).

Os princípios fundamentais da proteção radiológica, estabelecidos pela ICRP, podem ser resumidos em três pilares essenciais: justificação, otimização e limitação da dose. O princípio da justificação estabelece que qualquer prática que envolva a exposição à radiação ionizante deve ser rigorosamente avaliada, garantindo que os benefícios superem os riscos

associados. Isso significa que a introdução de uma nova fonte de radiação ou a realização de procedimentos que utilizem radiação deve trazer mais benefícios do que danos potenciais (ALBERTS *et al.*, 2022).

O princípio da otimização, também conhecido como princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), determina que as doses de radiação devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente possível, considerando fatores econômicos e sociais. Isso envolve a implementação de medidas técnicas e organizacionais para minimizar a exposição, sem comprometer a eficácia das atividades realizadas (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2020).

2.4.1. Limites de dose individual

Uma medida fundamental para assegurar o uso seguro da radiação baseia-se em práticas que envolvam a limitação da dose de radiação recebida em determinada atividade. Esse princípio é um dos pilares da proteção radiológica e visa garantir que os níveis de exposição à radiação ionizante sejam mantidos dentro de limites seguros, tanto para trabalhadores ocupacionalmente expostos quanto para o público em geral.

Os limites de exposição à radiação ionizante são determinados com base em estudos científicos que avaliam os riscos à saúde associados a essa exposição. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão responsável por regulamentar e fiscalizar esses limites, e o faz por meio da norma CNEN NN 3.01, intitulada "Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação".

Esta norma foi atualizada no ano de 2024, e na nova versão incorporou as mais recentes recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), com objetivo de alinhar-se às melhores práticas internacionais em proteção radiológica.

Na nova versão da norma o escopo foi ampliado para abranger todas as práticas que envolvem exposição à radiação ionizante, incluindo atividades relacionadas a instalações, fontes de radiação e emergências. Além disso, foram incluídos requisitos, até então não abarcados na versão anterior, para práticas como a proteção do meio ambiente e a segurança radiológica em situações de exposições crônicas e emergenciais (CNEN, 2024).

Outro avanço significativo da nova versão da norma são as diretrizes mais claras e abrangentes para emergências radiológicas. A norma agora foca não apenas na mitigação de danos, mas também na prevenção e preparação, incluindo a integração com sistemas de alerta

e monitoramento, além da capacitação contínua dos profissionais envolvidos. Essas diretrizes são essenciais para garantir uma resposta eficaz em casos de acidentes ou exposições não planejadas, e encontram alinhamento com a proposta do presente trabalho. A Tabela 3.4.1, apresenta os limites de dose, com base na Resolução CNEN 323/24 (CNEN NN 3.01, 2024).

Tabela 2.4.1- Limites de dose anual para IOE e Público Geral. Fonte: (CNEN NN 3.01, 2024)

GRANDEZA	ÓRGÃO	INDIVÍDUO OCUPACIONALMENTE EXPOSTO	INDIVÍDUO DO PÚBLICO
Dose Efetiva	Corpo Inteiro	20 mSv	1 mSv
	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mão e Pés	500 mSv	----

Com base na Resolução CNEN 323/24, que atualiza a Norma CNEN NN 3.01, o termo "dose anual" é definido como a dose acumulada durante o ano calendário, compreendendo o período de janeiro a dezembro de cada ano.

As regulamentações exigem que a média aritmética da dose efetiva seja calculada em intervalos de cinco anos consecutivos, com a condição de que o valor da dose efetiva não exceda 50mSv em qualquer um desses anos. Essa abordagem visa equilibrar a exposição à radiação ao longo do tempo, evitando picos de dose que possam representar riscos significativos à saúde.

Além disso, a média de dose efetiva ao longo de cinco anos não deve ultrapassar 20mSv por ano para trabalhadores ocupacionalmente expostos, conforme estabelecido pela norma (CNEN, 2024).

Em circunstâncias excepcionais, a CNEN possui a prerrogativa de autorizar uma dose efetiva de até 5mSv em um único ano, desde que a média da dose efetiva ao longo de um período de cinco anos consecutivos não ultrapasse 1mSv por ano. Essa flexibilidade é aplicada em situações específicas, como emergências radiológicas ou atividades que demandam exposição controlada, sempre com o objetivo de minimizar os riscos à saúde e ao meio ambiente.

Além das medidas de proteção convencionais, o uso de ferramentas computacionais para modelagem e simulação de cenários acidentais desempenha um papel fundamental na previsão e mitigação de riscos.

Modelos matemáticos avançados permitem simular a dispersão de radionuclídeos em diferentes condições ambientais, possibilitando a avaliação de estratégias de contenção e resposta a emergências (MILLER *et al.*, 2017).

No presente trabalho, a simulação computacional é utilizada para analisar os impactos de um incêndio em um depósito de rejeitos radioativos, avaliando a dispersão de radionuclídeos e a conformidade com as normas nacionais estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Dessa forma, ao integrar simulações preditivas com regulamentações de segurança, a pesquisa reforça a importância do acompanhamento contínuo e do controle regulatório para minimizar cenários acidentais e seus impactos à saúde humana e ao meio ambiente.

2.4.2. Grandezas e Unidades Dosimétricas

2.4.2.1. Dose Absorvida

A quantidade dosimétrica fundamental na proteção radiológica é a dose absorvida (D_T), que é definida como a energia absorvida ($d\varepsilon$) por unidade de massa (dm). Este conceito é crucial para avaliar os efeitos da radiação ionizante no corpo humano e em outros materiais. A dose absorvida fornece uma medida precisa da quantidade de radiação que foi depositada em uma determinada massa de tecido ou material, sendo um parâmetro essencial para garantir a segurança radiológica.

$$D_T = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2.1)$$

A unidade, no Sistema Internacional de Unidades (SI) para dose absorvida (D_T), é o joule por quilograma (J/kg), também denominada *gray* (Gy). Embora a dose absorvida possa ser especificada em um ponto, é frequentemente utilizada para indicar a dose média recebida por um tecido ou órgão.

2.4.2.2. Dose Equivalente

Como os efeitos biológicos da radiação variam conforme sua qualidade, isto é, seu tipo e energia, uma mesma dose absorvida pode gerar impactos distintos nos tecidos biológicos.

Para permitir a comparação entre os efeitos de diferentes tipos de radiação, foi desenvolvido um conceito que considera essas variações. Algumas radiações possuem maior capacidade de induzir efeitos estocásticos do que outras, tornando necessário o uso da grandeza denominada dose equivalente (H_T).

Essa grandeza é obtida ao multiplicar a dose absorvida média em um determinado órgão ou tecido ($D_{T,R}$) por um fator de peso adimensional da radiação (W_R) o qual depende do tipo e da energia da radiação incidente (R), resultando na equação:

$$H_T = D_{T,R} W_R \quad (2.2)$$

A unidade da dose equivalente é J/Kg e recebe o nome especial de sievert (Sv). Os valores dos fatores de peso da radiação (W_R) foram estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 1991). Esses fatores levam em consideração tanto a radiação externa incidente sobre o corpo quanto a radiação emitida por radionuclídeos depositados internamente no organismo.

2.4.2.3. Dose Efetiva

A dose efetiva (E) é definida como a soma das doses equivalentes recebidas pelos diferentes órgãos e tecidos do corpo, ponderadas por seus respectivos fatores de peso. Essa relação pode ser expressa matematicamente como:

$$E = \sum_T W_T H_T \quad (2.3)$$

Na equação, (W_T) representa o fator de ponderação para um determinado tecido ou órgão (T), enquanto (H_T), corresponde à dose equivalente associada a este tecido. A grandeza Dose Efetiva (E) é expressa em joules por quilograma (J/kg), sendo denominada Sievert (Sv) (CASTRO, 2005).

Adicionalmente, a dose efetiva deve ser avaliada considerando o valor médio em uma área de 1cm² na região mais irradiada. Esse procedimento de avaliação é essencial para assegurar a conformidade com os limites de exposição estipulados, contribuindo substancialmente para a proteção da saúde humana contra os potenciais riscos associados à

radiação ionizante. A medição precisa e o monitoramento contínuo são fundamentais para garantir que os níveis de exposição permaneçam dentro dos limites seguros (CNEN, 2024).

Por sua vez, a Dose Efetiva Total (TED) representa a soma das doses efetivas recebidas por um indivíduo devido à exposição a diferentes fontes de radiação ionizante ao longo do tempo. Ela considera a contribuição de exposições externas e internas, ponderadas conforme os fatores de peso dos órgãos e tecidos envolvidos. No contexto do estudo, a TED é analisada em função da distância a partir do ponto de emissão da pluma radioativa e do tipo de terreno, refletindo a distribuição e o impacto da radiação nos diferentes cenários simulados.

2.5. EMPREGO DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

As radiações ionizantes são amplamente empregadas em diversas áreas, como saúde, indústria, agricultura, pesquisa e geração de energia elétrica, desempenhando um papel crucial no avanço tecnológico e no bem-estar da humanidade. Suas aplicações incluem desde diagnósticos médicos e tratamentos de câncer até o controle de qualidade de materiais industriais e o aumento da produtividade agrícola. Além disso, são fundamentais para a geração de energia nuclear, uma fonte limpa e eficiente que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

No entanto, para garantir que esses benefícios sejam aproveitados de forma segura e sustentável, é essencial compreender os efeitos da interação da radiação com a matéria. Fatores como o tempo de exposição, a dose de radiação e a distância da fonte influenciam diretamente os resultados dessa interação, que pode variar desde efeitos terapêuticos, como a destruição de células cancerígenas, até potenciais danos celulares ou mutações genéticas quando não há controle adequado.

Por isso, o uso responsável das radiações ionizantes requer a implementação de medidas rigorosas de proteção radiológica, monitoramento constante e a capacitação dos profissionais envolvidos. Dessa forma, é possível maximizar os benefícios dessa tecnologia, garantindo sua aplicação segura e eficaz em prol do desenvolvimento humano e da preservação do meio ambiente.

Na agricultura, o uso de fontes de radiação na irradiação de alimentos tem sido amplamente empregado para melhorar a qualidade e a segurança dos produtos alimentícios. Essa técnica é aplicada em frutas frescas, grãos e vegetais, prevenindo o brotamento, retardando a maturação e prolongando o tempo de conservação. Além disso, a irradiação facilita o

armazenamento e o transporte das safras, reduzindo perdas e evitando a proliferação de doenças e a deterioração rápida dos produtos. Dessa forma, contribui para a segurança alimentar e a sustentabilidade na cadeia produtiva (EMBRAPA, 2021).

Na indústria, uma das técnicas nucleares mais reconhecidas é a gamagrafia, que consiste na realização de radiografias de peças metálicas ou estruturas de concreto. Esse método permite a detecção de defeitos, como rachaduras ou falhas, que poderiam comprometer a integridade de equipamentos ou infraestruturas. A gamagrafia é amplamente utilizada no controle de qualidade de soldas, na fabricação de equipamentos industriais e na inspeção de gasodutos, garantindo a segurança e a durabilidade das construções (CRUZ *et al.*, 2024).

As técnicas nucleares são amplamente utilizadas em pesquisas voltadas para a monitoração e recuperação ambiental. Por meio de traçadores radioativos, possibilitando a avaliação de recursos hídricos, estudo do solo, e monitoramento do trajeto de poluentes no ar, na água e no solo (AIEA, 2022). Além disso, essas técnicas permitem a datação de superfícies, sedimentos marinhos, árvores e sítios arqueológicos, fornecendo informações valiosas para a compreensão de processos naturais e históricos.

As usinas nucleares são instalações projetadas para a produção de energia elétrica por meio de reações de fissão nuclear. Durante o processo, o calor gerado pela fissão do urânio aquece a água no circuito primário, que, por sua vez, transfere calor para o circuito secundário, produzindo vapor. Esse vapor movimentava turbinas, acionando geradores elétricos. O sistema é composto por três circuitos independentes, garantindo que a água radioativa não entre em contato com o meio ambiente. As usinas nucleares oferecem alto grau de proteção, com sistemas de segurança redundantes e independentes (ELETRONUCLEAR, 2011).

Uma das principais vantagens ambientais da energia nuclear é a não utilização de combustíveis fósseis, evitando a emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global e outros poluentes atmosféricos. Além disso, as usinas ocupam áreas relativamente pequenas, podem ser instaladas próximas aos centros consumidores e não dependem de fatores climáticos, como chuva ou vento, para operar. O Urânio, utilizado como combustível, é abundante e de baixo custo, garantindo suprimento a médio e longo prazo. Um dos principais desafios da energia nuclear é o gerenciamento adequado dos resíduos radioativos a partir da adoção de práticas seguras e sustentáveis para o armazenamento e a disposição final desses materiais, garantindo a proteção do meio ambiente e das gerações futuras.

Na medicina nuclear, o uso da radiação para diagnóstico e tratamento de doenças representa a principal fonte artificial de exposição à radiação em todo o mundo, sendo o

segundo maior contribuinte para a exposição global da população, atrás apenas das fontes naturais (UNSCEAR, 2017). A maior parte dessas exposições ocorre em países industrializados, onde há maior acesso a recursos médicos e uma utilização mais intensa de equipamentos de radiologia.

As práticas médicas que envolvem radiação podem ser divididas em três categorias principais: radiologia, medicina nuclear e radioterapia. Um dos radioisótopos mais comuns é o Iodo-131, amplamente utilizado no diagnóstico e tratamento de doenças da tireoide (MCCREADY, 2017). Outra aplicação importante é a radioesterilização, técnica empregada na esterilização de sangue e seus derivados, materiais cirúrgicos e tecidos humanos destinados a transplantes (AIEA, 2008).

2.6. GERENCIAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS

O uso de radioisótopos em diversas aplicações, como mencionado no tópico anterior, gera rejeitos radioativos que exigem um gerenciamento cuidadoso e especializado. Esses rejeitos variam em termos de atividade radioativa, meia-vida e volume, demandando estratégias específicas para seu armazenamento, transporte e disposição final. O gerenciamento adequado desses materiais é essencial para garantir a segurança radiológica, proteger o meio ambiente e minimizar os riscos à saúde humana.

Os rejeitos radioativos são definidos como materiais que contêm ou estão contaminados com radionuclídeos em concentrações ou níveis de atividade que excedem os limites de isenção estabelecidos pela autoridade reguladora no Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Conforme destacado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2009), esses materiais, em geral, não possuem nenhuma possibilidade de utilização imediata ou futura devido à sua natureza radioativa.

O gerenciamento de rejeitos radioativos envolve uma série de etapas, desde a classificação, segregação e transporte dos materiais até o armazenamento temporário e a disposição final. Durante todo o processo, é essencial adotar medidas de proteção radiológica, como o uso de blindagens, monitoramento constante e capacitação dos profissionais envolvidos. Um dos principais desafios no gerenciamento de rejeitos radioativos é garantir o isolamento a longo prazo desses materiais, evitando a contaminação do solo, da água e do ar. Logo, a classificação e o manejo adequado dos rejeitos radioativos são fundamentais para alinhar as práticas nacionais aos padrões globais de segurança (AIEA, 2009).

2.6.1. Contexto e Importância da Aplicação das Normas da CNEN no Gerenciamento de Rejeitos Radioativos

O gerenciamento de rejeitos radioativos é uma das atividades mais críticas no âmbito da energia nuclear, demandando rigorosos controles técnicos, operacionais e regulatórios para garantir a segurança radiológica, a proteção do meio ambiente e a saúde pública.

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão responsável por estabelecer as normas e diretrizes que regulamentam todas as etapas do ciclo de vida dos rejeitos radioativos, desde sua geração até a disposição final. A aplicação dessas normas não apenas assegura o cumprimento das melhores práticas internacionais, mas também estabelece um vínculo indissociável entre a análise de segurança e a gestão eficaz dos rejeitos.

As normas da CNEN são elaboradas com base em recomendações de organismos internacionais, como a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), e adaptadas às particularidades do cenário brasileiro. Elas abrangem desde a seleção de locais para depósitos até o transporte e disposição final dos rejeitos, passando por etapas intermediárias como tratamento, acondicionamento e armazenamento.

A Resolução CNEN 167/14 (NN 8.01), por exemplo, estabelece os requisitos para a gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, enfatizando a necessidade de um planejamento integrado que considere aspectos técnicos, ambientais e sociais. Por sua vez, a implementação efetiva desta e de outras normas enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito à harmonização entre as demandas técnicas e as expectativas socioambientais (SILVA; MENEZES, 2015).

A Resolução CNEN 168/14 (NN 8.02) complementa a abordagem da norma CNEN NN 8.01 ao definir os critérios para o licenciamento de depósitos de rejeitos, garantindo que essas instalações atendam a padrões rigorosos de segurança e proteção radiológica.

Já a Resolução CNEN 012/02 (NN 6.09) estabelece critérios de aceitação para a deposição de rejeitos, assegurando que apenas materiais que atendam a parâmetros específicos sejam destinados à disposição final. Essas normas, em conjunto, são parte de um arcabouço regulatório robusto que orienta todas as etapas do gerenciamento de rejeitos.

2.6.2. Análise de Segurança e Dependência Normativa

A análise de segurança é um componente fundamental no gerenciamento de rejeitos radioativos, uma vez que identifica e mitiga riscos potenciais associados às atividades nucleares. No Brasil, essa análise está intrinsecamente ligada ao cumprimento das normas da CNEN, pois cada etapa do processo de gerenciamento de rejeitos exige a aplicação de procedimentos específicos para garantir a segurança.

Conforme Lapa e Campos (2010), a integração entre normas técnicas e análise de segurança é essencial para garantir a eficácia do gerenciamento de rejeitos, especialmente em casos práticos que envolvem múltiplas variáveis, como licenciamento de instalações, segregação de materiais, transporte e armazenamento.

Por exemplo, a Resolução CNEN 271/21 (NN 5.01), que regulamenta o transporte seguro de materiais radioativos, estabelece requisitos detalhados para embalagens, rotas de transporte e treinamento de pessoal, reduzindo significativamente os riscos de acidentes durante o deslocamento dos rejeitos (OLIVEIRA; SANTOS, 2020).

Já a Resolução CNEN 293/22 (NN 6.02), trata do licenciamento de instalações radiativas, exige uma avaliação prévia dos riscos associados à operação dessas instalações, incluindo a geração e o manejo de rejeitos. Essa avaliação só pode ser realizada com base nos critérios estabelecidos pelas normas pertinentes, demonstrando a dependência direta entre a análise de segurança e o cumprimento assertivo das normas para cada atividade (FERNANDES; FRANKLIN, 2005).

Por outro lado, a aplicação das normas da CNEN no gerenciamento de rejeitos radioativos não se limita ao aspecto técnico, ela também possui implicações sociais e ambientais. A exemplo disto, tem-se a Resolução CNEN 014/89 (NE 6.06), que estabelece critérios para a seleção de locais para depósitos de rejeitos, que exige uma avaliação detalhada das características geológicas, hidrológicas e socioeconômicas da região, garantindo que a disposição final dos rejeitos não comprometa o meio ambiente nem a qualidade de vida das comunidades vizinhas.

Rocha e Fernandes (2018) reforçam a importância dessa avaliação, destacando que o impacto radiológico dos depósitos de rejeitos deve ser minimizado por meio do cumprimento rigoroso das normas.

Esses exemplos ilustram como o gerenciamento de rejeitos radioativos é uma atividade complexa que exige a integração de múltiplos aspectos técnicos, regulatórios e sociais. Neste

cenário, normas da CNEN desempenham um papel central nesse processo, fornecendo um lastro regulatório que orienta todas as etapas do ciclo de vida dos rejeitos. Verifica-se ainda que a análise de segurança, está intrinsecamente ligada ao cumprimento dessas normas, uma vez que cada etapa do gerenciamento de rejeitos depende da aplicação assertiva de procedimentos específicos para garantir a proteção radiológica, a segurança operacional e a preservação do meio ambiente.

Portanto, a aplicação das normas da CNEN não apenas assegura o cumprimento das melhores práticas internacionais, mas também reforça a confiança da sociedade nas atividades nucleares, demonstrando o compromisso do setor com a segurança, a transparência e a responsabilidade socioambiental. A continuidade desse esforço regulatório, aliada à adoção de tecnologias inovadoras, como a simulação computacional, e à capacitação de profissionais, são peças-chave para o avanço sustentável da energia nuclear no Brasil.

2.6.3. Depósito de rejeitos radioativos

Um depósito de rejeitos radioativos é uma instalação projetada especificamente para o armazenamento, tratamento e disposição segura desses materiais, seguindo normas rigorosas que visam mitigar os riscos associados à radiação. A classificação dos rejeitos constitui uma etapa essencial para definir os procedimentos adequados de armazenamento, tratamento e disposição final dos rejeitos, garantindo que cada tipo de resíduo seja manejado de acordo com suas características específicas.

Uma etapa crucial no gerenciamento de rejeitos radioativos é o conhecimento detalhado do inventário, cuja principal finalidade é fornecer informações precisas sobre a identificação de todas as fontes de rejeitos, sua localização, quantidade e características radiológicas dos materiais armazenados nos depósitos. Essa ferramenta desempenha um papel fundamental ao garantir a rastreabilidade dos rejeitos desde o momento de sua geração até a etapa final de disposição, assegurando que cada etapa do processo seja monitorada e controlada de maneira eficiente.

Além de promover a rastreabilidade, o inventário tem como objetivo garantir a conformidade com as normas técnicas e regulamentações vigentes, atendendo rigorosamente aos requisitos estabelecidos pela CNEN.

Essa conformidade é essencial para assegurar que todas as operações relacionadas aos rejeitos sejam realizadas dentro dos padrões de segurança e qualidade exigidos. Outro aspecto

relevante é a priorização da transparência e da acessibilidade, que facilitam a consulta e a auditoria por parte das autoridades reguladoras e demais partes interessadas.

Uma das informações a serem consideradas nos inventários diz respeito a categorização dos rejeitos base nos níveis de radiação, meia-vida e natureza dos radionuclídeos presentes. Essa classificação serve de base para posterior definição do tipo de depósito adequado para recebimento do material. Dessa forma, os rejeitos podem ser classificados como:

- Classe 0: Rejeitos Isentos (RI) – Materiais com níveis de atividade abaixo ou iguais aos limites de dispensa estabelecidos pela Norma CNEN NN 8.01. Esses rejeitos não representam riscos significativos e podem ser tratados como materiais não-radioativos, seguindo a forma convencional de descarte de resíduos.
- Classe 1: Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC) – Rejeitos com meia-vida inferior a 100 dias, que podem atender aos critérios de dispensa em até cinco anos. A gestão desses resíduos é facilitada pela rápida redução de sua atividade radiológica.
- Classe 2: Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN) – Inclui subcategorias como rejeitos de meia-vida curta, rejeitos contendo radionuclídeos naturais e rejeitos de meia-vida longa. Esses rejeitos, podem tanto demandar soluções de contenção em depósitos intermediários, como permanente utilizando depósitos geológicos.
- Classe 3: Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN) – Materiais com potência térmica superior a 2 kW/m³ e concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedem os limites para classificação como rejeitos de meia-vida curta. Esses rejeitos demandam soluções de contenção permanente em depósitos geológicos.

Já os depósitos podem ser classificados como: inicial, intermediário e final. Cada um deles desempenha um papel específico no ciclo de vida dos rejeitos, desde sua geração até a disposição permanente. O depósito inicial, também conhecido como temporário, é a primeira etapa no gerenciamento de rejeitos radioativos. Ele é projetado para armazenar os resíduos no local onde são gerados, como usinas nucleares, hospitais ou laboratórios de pesquisa. Esse tipo de depósito é licenciado como parte integrante da instalação radiativa e deve garantir a contenção segura dos rejeitos durante o período de armazenamento provisório.

Conforme destacado por Silva e Menezes (2015), a principal função desse depósito é evitar a dispersão de materiais radioativos no ambiente enquanto se aguarda a transferência para instalações mais adequadas. A segurança nessa etapa é crítica, pois qualquer falha pode resultar em contaminação localizada, com impactos significativos para a saúde pública e o meio ambiente.

O depósito intermediário consiste em uma solução projetada para receber e acondicionar os rejeitos radioativos, preparando-os para a transferência ao depósito final. Esse tipo de instalação é especialmente importante para resíduos de baixo e médio níveis de radiação, que representam a maior parte dos rejeitos gerados em atividades nucleares e médicas.

Oliveira *et al.* (2018) ressaltam que o depósito intermediário desempenha um papel crucial no processo de gestão, pois permite que os rejeitos sejam tratados e acondicionados de forma segura, minimizando riscos de contaminação durante o período de transição. Além disso, essa etapa é essencial para garantir que os resíduos estejam em condições adequadas para a disposição final, conforme resolução CNEN 012/02 (NN 6.09).

O depósito final, por sua vez, é a solução definitiva para a contenção de rejeitos radioativos. Projetado para isolar os resíduos do meio ambiente por períodos que podem superar milhares de anos, esse tipo de depósito exige licenciamento específico e deve seguir normas técnicas rigorosas. A CNEN estabelece, por exemplo, na resolução CNEN 012/02 (NN 6.09) que rejeitos na forma líquida ou gasosa não podem ser recebidos em depósitos finais, o que reforça a necessidade de tratamento prévio dos resíduos.

Lapa e Campos (2010) destacam que a construção e operação de depósitos finais são fundamentais para prevenir a liberação de radiação e garantir a segurança a longo prazo, especialmente para rejeitos de alto nível de radiação. Esses depósitos são frequentemente construídos em formações geológicas estáveis, como camadas profundas de rochas, que oferecem barreiras naturais contra a migração de radionuclídeos.

Em situações emergenciais, como acidentes nucleares ou radiológicos, depósitos provisórios podem ser utilizados para o armazenamento temporário dos rejeitos até que possam ser transferidos para instalações intermediárias ou finais. Esses depósitos são projetados para atender a necessidades imediatas, mas devem ser desativados assim que os rejeitos forem removidos e transferidos para locais adequados. A flexibilidade e a capacidade de resposta rápida são características essenciais dessas instalações, que devem ser capazes de lidar com volumes variáveis de resíduos em condições adversas.

2.7. INCÊNDIOS EM INSTALAÇÕES NUCLEARES E RADIATIVAS

Incêndios em instalações que lidam com materiais radioativos, como depósitos de rejeitos nucleares ou usinas de energia nuclear, representam um dos desafios mais complexos no campo da segurança radiológica e da proteção ambiental. Diferentemente dos incêndios convencionais, os incêndios radiológicos exigem abordagens específicas devido ao risco de dispersão de radiação ionizante, que pode ter consequências para a saúde pública e o meio ambiente.

Conforme a NBR 12693 (ABNT, 2010), a classificação dos incêndios é uma ferramenta essencial para orientar as ações de combate ao fogo, garantindo que os métodos de extinção sejam adequados ao tipo de material envolvido. Incêndios de Classe A, por exemplo, envolvem materiais sólidos como madeira, papel e tecidos, e são combatidos com agentes de resfriamento, como água ou espuma. Já os de Classe B, que envolvem líquidos inflamáveis como gasolina e óleo, exigem o uso de espuma, pó químico seco ou dióxido de carbono (CO₂), evitando-se o uso de água, que pode espalhar o combustível. Incêndios de Classe C, que ocorrem em equipamentos elétricos energizados, requerem agentes não condutores, como pó químico seco ou CO₂.

Quando se trata de incêndios radiológicos, a complexidade aumenta exponencialmente, exigindo abordagens que vão além dos métodos convencionais. O principal risco associado a esses incêndios não é apenas o fogo em si, mas a potencial dispersão de material radioativo, que pode contaminar o ambiente e expor pessoas a radiações ionizantes.

Conforme destacado por Smith *et al.* (2017), a liberação de partículas radioativas durante um incêndio pode resultar em contaminação do ar, solo e água, com impactos de longo prazo para a saúde humana e o ecossistema.

Esses incêndios podem ocorrer em reatores nucleares, áreas de armazenamento de combustível irradiado ou depósitos de rejeitos radioativos. Materiais em combustão presentes nessas instalações, podem liberar partículas radioativas durante um incêndio, especialmente se houver danos às barreiras de contenção.

Desse modo a dispersão de material radioativo é veiculada pela fumaça e as partículas liberadas durante o incêndio podem carregar radionuclídeos, contaminando o ar, o solo e a água.

Neste contexto, a aplicação de métodos convencionais de extinção de incêndios, como uso da água, pode ser contraproducente, pois pode espalhar partículas radioativas ou causar reações químicas perigosas, sendo recomendado o uso de agentes extintores que não envolvam

água, como pó químico seco ou gases inertes, para evitar a dispersão de partículas radioativas. Em alguns casos, métodos de contenção, como o uso de materiais absorventes ou barreiras físicas, podem ser empregados para limitar a propagação do fogo e da contaminação.

Além disso, as equipes de combate ao fogo precisam usar equipamentos de proteção radiológica, como trajes especiais e respiradores, para evitar a exposição à radiação.

Logo, a resposta a incêndios radiológicos exige uma abordagem multidisciplinar, envolvendo equipes de emergência, especialistas em radiação e agências governamentais. Conforme destacado por Oliveira *et al.* (2018), os procedimentos de resposta devem identificar a presença de materiais radioativos e avaliar a extensão do incêndio, utilizando equipamentos de detecção de radiação, como dosímetros e contadores Geiger, essenciais para monitorar os níveis de radiação em tempo real.

O conhecimento das informações sobre o inventário dos materiais armazenados na instalação também é importante para orientação das ações de mitigação de danos.

Em certos casos, pode ser necessário evacuar as áreas circundantes e estabelecer uma zona de exclusão para proteger o público e os trabalhadores de uma possível exposição à radiação. Após o controle do incêndio, é crucial monitorar a área para garantir que não haja vazamentos contínuos de radiação. Equipes especializadas em descontaminação devem ser acionadas para limpar o local e reduzir os riscos de exposição residual.

2.8. ANÁLISE DE EVENTOS ENVOLVENDO INCÊNDIO EM DEPÓSITOS DE REJEITOS

A gestão de resíduos radioativos e a operação de instalações nucleares são atividades que exigem extrema precisão e rigorosos protocolos de segurança. No entanto, ao longo da história, incidentes graves têm ocorrido, destacando falhas críticas e servindo como alertas para a necessidade de melhores práticas e sistemas de prevenção.

A seguir são apresentados alguns dos mais significativos incidentes reais envolvendo incêndios em depósitos de rejeitos radioativos e instalações nucleares. O estudo destes eventos oferece lições valiosas para se compreender melhor os desafios enfrentados na gestão de resíduos nucleares e as medidas necessárias para prevenir incidentes, a partir da análise dos riscos associados ao manuseio de materiais radioativos, a importância da manutenção adequada e a eficácia dos sistemas de resposta a emergências, devendo cada uma destas fases ser orientada conforme regulamentação exigida.

2.8.1. Desastre de Kyshtym, Chelyabinsk-URSS em 1957

Em 29 de setembro de 1957 no Complexo Nuclear de Mayak, localizado na região de Chelyabinsk, na antiga União Soviética, ocorreu o incêndio em depósito de rejeito considerado o mais grave acidente nuclear da história deste tipo, classificado como nível 6 na Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES).

Este incidente, conhecido como o "Desastre de Kyshtym", destacou a importância crítica de assegurar a manutenção adequada dos sistemas de resfriamento e a monitoração constante dos níveis de calor em tanques de resíduos radioativos. A falta dessas medidas essenciais resultou em uma explosão química que liberou uma quantidade significativa de material radioativo no meio ambiente, com consequências devastadoras para a população local e o ecossistema.

De acordo com Medvedev (1979), o Complexo de Mayak foi construído no final dos anos 1940 como parte do programa nuclear soviético, cujo objetivo principal era a produção de plutônio para armas nucleares. A instalação estava equipada com tanques de aço para armazenar resíduos líquidos altamente radioativos, provenientes do processamento de combustível nuclear.

No entanto, os sistemas de resfriamento desses tanques eram inadequados e frequentemente negligenciados, o que levou ao acúmulo de calor residual gerado pela decomposição radioativa dos materiais e que não foi dissipado adequadamente, resultando em um aumento drástico da temperatura e pressão dentro de um dos tanques que continha entre 70 e 80 toneladas de resíduos. Quando a pressão atingiu um ponto crítico, ocorreu uma explosão química que liberou aproximadamente 20 milhões de curies de material radioativo na atmosfera (SMITH, 1989).

Com a explosão ocorreu a dispersão de uma pluma radioativa, Figura 2.8.1, que contaminou uma área de aproximadamente 20.000Km², afetando cerca de 270.000 pessoas da cidade de Kyshtym e outras comunidades próximas que precisaram ser evacuadas de suas casas. A exposição à radiação causou a morte imediata de aproximadamente 200 pessoas devido à síndrome aguda de radiação, e muitas outras sofreram efeitos a longo prazo, como aumento na incidência de câncer e outras doenças relacionadas à radiação (Medvedev, 1979).

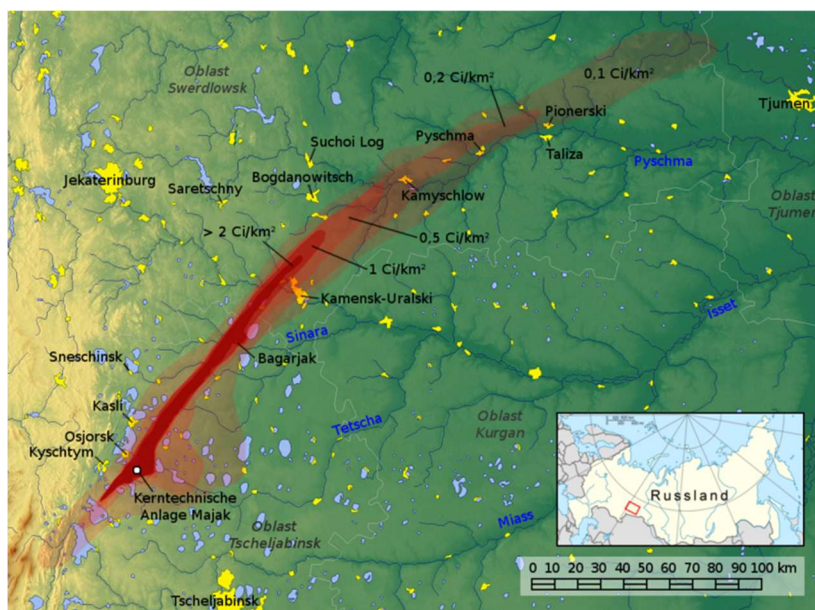


Figura 2.8.1- Mapa dos traços de radioatividade na área dos Urais Orientais, contaminada pelo desastre de Kyshtym. Fonte: FAKTOPEDIA, 2021.

Após o incidente houve uma revisão significativa das práticas de segurança em instalações nucleares, tanto na União Soviética quanto em outros países. Medidas como a implementação de sistemas de resfriamento redundantes, a realização de inspeções regulares e o treinamento adequado dos operadores tornaram-se padrões essenciais, hoje adotados no gerenciamento de rejeitos radioativos, para prevenir a ocorrência de desastres similares (Smith, 1989).

O desastre de Mayak destacou a necessidade de práticas rigorosas de segurança e manutenção em instalações nucleares. A simulação computacional emerge como uma ferramenta indispensável para aprimorar a segurança nuclear, permitindo a análise detalhada de cenários críticos e a implementação de medidas preventivas eficazes.

No caso de Mayak, por exemplo, a simulação computacional poderia ter sido utilizada para prever o acúmulo de calor nos tanques de resíduos e identificar a necessidade de sistemas de resfriamento mais robustos. Além disso, simulações poderiam ter ajudado a desenvolver protocolos de emergência mais eficazes, como a evacuação de áreas adjacentes e a contenção de materiais radioativos liberados (Anderson et al., 2020).

2.8.2. Incêndio Rocky Flats, Colorado-USA em 1969

O incêndio ocorrido em 11 de maio de 1969 na instalação de Rocky Flats, localizada próximo a Denver, Colorado, teve repercussões significativas para a segurança nuclear e a gestão de materiais radioativos. A planta, que desempenhava um papel central no programa de armamento nuclear do país, era responsável pela produção de componentes de plutônio para armas nucleares. O incidente expôs falhas críticas nos protocolos de segurança e na preparação para emergências, destacando a necessidade de reformas profundas no setor (CARTER, 2010).

O incêndio foi deflagrado por uma faísca originada de resíduos de plutônio dentro de uma *glovebox*, equipamento selado utilizado para a manipulação segura de materiais radioativos. A natureza inflamável do plutônio, que pode entrar em combustão espontânea em contato com o ar, contribuiu para a rápida propagação do fogo. A complexidade do incêndio, aliada à presença de plutônio em combustão, tornou o combate às chamas extremamente desafiador (SMITH e BROWN, 2015).

Conforme destacado por Johnson *et al.* (2018), a falta de treinamento específico para lidar com emergências envolvendo materiais radioativos agravou a situação, resultando na dispersão de partículas de plutônio no ar e na contaminação parcial da área interna da instalação. Embora a contaminação não tenha atingido níveis críticos na comunidade circundante, os trabalhadores expostos enfrentaram sérias consequências para a saúde, incluindo riscos aumentados de câncer e outras doenças relacionadas à radiação.

A contaminação radioativa em Rocky Flats foi amplificada por outros eventos anteriores, como o incêndio ocorrido em 1957 e o vazamento de barris em uma área de armazenamento externa entre 1964 e 1968, que contribuíram para a persistência de níveis significativos de contaminação por actínídeos na região (EPA, 2021), Figura 2.8.2.

O incidente de Rocky Flats teve um impacto profundo nas práticas de segurança e gestão de materiais radioativos. A investigação pós-acidente revelou a necessidade de diretrizes mais rigorosas para o manuseio de plutônio e outros materiais nucleares, bem como a importância de treinamentos especializados para equipes de emergência. Segundo Carter (2010), o evento catalisou a implementação de novas regulamentações, incluindo a revisão dos sistemas de ventilação, a adoção de equipamentos de proteção mais eficazes e a criação de protocolos de resposta a emergências mais robustos. Além disso, o incidente levou a um maior rigor nas práticas de gestão de resíduos nucleares, com ênfase na prevenção de acidentes e na proteção da saúde pública (SMITH e BROWN, 2015).

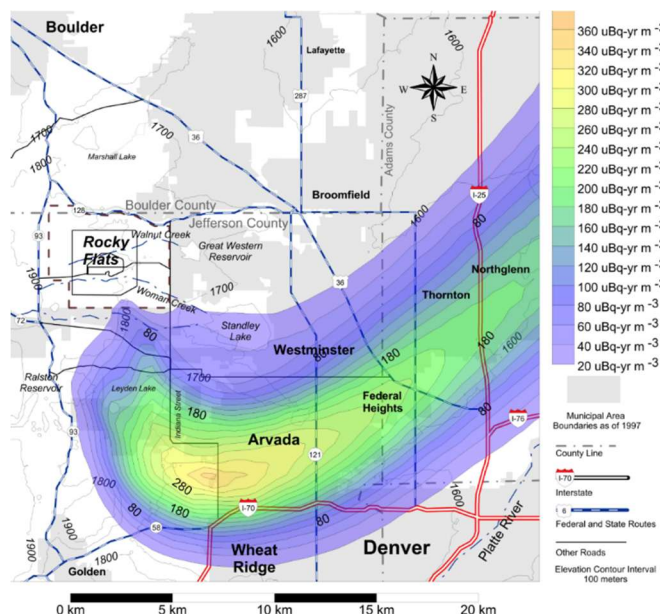


Figura 2.8.2- Estimativa da pluma de plutônio (Pu-239) do incêndio em Rocky Flats. Fonte: K-spar Inc., 2025.

2.8.3. Incêndio de WIPP, Novo México-USA em 2014

O incêndio ocorrido em 14 de fevereiro de 2014 na Planta Piloto de Isolamento de Resíduos (WIPP), localizada em Carlsbad, Novo México, Estados Unidos, destaca os desafios e riscos associados ao armazenamento subterrâneo de materiais radioativos. Este incidente, que teve início em um veículo subterrâneo utilizado para transporte de sal, evidenciou a necessidade de treinamentos regulares, sistemas de resposta rápidos e a constante revisão de protocolos de segurança em instalações que lidam com resíduos nucleares (DOE, 2015).

A WIPP é uma instalação projetada para o descarte seguro e permanente de resíduos radioativos transurânicos, provenientes principalmente de atividades de defesa nacional. Localizada em uma área remota próxima a Carlsbad, a planta foi concebida para minimizar riscos ambientais e à saúde pública. No entanto, o incêndio de 2014 expôs vulnerabilidades não antecipadas, como falhas em sistemas de ventilação e a propagação rápida do fogo em áreas subterrâneas (JOHNSON; MARTINEZ, 2016).

Segundo Harris *et al.* (2017), a complexidade do armazenamento subterrâneo de materiais radioativos demanda sistemas de monitoramento avançados e protocolos de emergência bem definidos, capazes de responder a situações imprevistas. O incêndio foi contido graças à rápida mobilização da equipe de resposta, que utilizou equipamentos especializados e seguiu procedimentos de segurança para evitar a dispersão de material radioativo. Apesar de a

radiação liberada ter permanecido abaixo dos níveis críticos, o incidente resultou na necessidade de descontaminação extensa de áreas afetadas e na suspensão temporária das operações da WIPP (DOE, 2015).

Em síntese, os incidentes em Mayak (1957), Rocky Flats (1969) e WIPP (2014) destacam a importância de uma abordagem integrada para a segurança nuclear, que inclui treinamento adequado das equipes, manutenção preventiva de equipamentos e análise pós-acidente para identificar falhas sistêmicas (MEDVEDEV, 1979; CARTER, 2010).

Conforme Johnson e Martinez (2016), a gestão de rejeitos radioativos exige não apenas infraestrutura adequada, mas também a previsão de cenários críticos por meio de simulações computacionais e a preparação contínua das equipes de emergência. Neste sentido, o uso de ferramentas como o software HOTSPOT tem se mostrado essencial para modelar a dispersão de radioisótopos em cenários críticos, nos quais a simulação da pluma radioativa pode ajudar na avaliação dos riscos para a saúde pública e o meio ambiente (THOMPSON; GREEN, 2015). Essas simulações permitem não apenas prever cenários de dispersão, mas também testar estratégias de mitigação e aprimorar os protocolos de emergência (AIEA, 2014).

2.9. PRINCÍPIOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE SEGURANÇA DE DEPÓSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS

A simulação computacional tem se consolidado como uma ferramenta indispensável no estudo da segurança de depósitos de rejeitos radioativos, permitindo a previsão do comportamento dos materiais radioativos e a avaliação contínua das medidas de segurança implementadas. Essa abordagem baseia-se em princípios fundamentais que integram modelagem matemática, métodos numéricos, validação experimental e análise de incertezas, garantindo que os resultados sejam confiáveis e aplicáveis à tomada de decisões.

A modelagem matemática é o alicerce da simulação computacional, envolvendo a descrição dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos depósitos de rejeitos radioativos. Esses modelos são construídos com base em equações diferenciais parciais, que descrevem com precisão o comportamento dos materiais radioativos e das barreiras de contenção ao longo do tempo.

Segundo Wang *et al.* (2019), a precisão desses modelos depende diretamente do entendimento dos fenômenos envolvidos e da qualidade dos dados experimentais utilizados para sua calibração. Esses parâmetros não apenas definem o cenário inicial do evento, mas

também influenciam diretamente a propagação do fogo, a dispersão de materiais radioativos e a eficácia das medidas de resposta. A seguir, são descritos os principais fatores que devem ser considerados:

- **Fonte de Ignição:** A origem do incêndio pode variar significativamente, desde causas acidentais, como curto-circuito em equipamentos elétricos ou falhas mecânicas, até eventos intencionais, como atos de vandalismo. Entender a natureza da ignição ajuda a prever a intensidade e a velocidade de propagação do fogo, por exemplo (LAPA; CAMPOS, 2010);
- **Materiais Combustíveis:** Os materiais envolvidos no incêndio incluem não apenas os rejeitos radioativos em si, que podem estar em estado sólido, líquido ou gasoso, mas também os materiais estruturais do depósito, como concreto, aço e outros componentes utilizados na construção. A composição química e física desses materiais determina a taxa de combustão, a quantidade de calor liberado e a produção de fumaça e partículas radioativas. Por exemplo, rejeitos líquidos podem evaporar e formar aerossóis, enquanto materiais sólidos podem liberar partículas contaminadas durante a combustão (SEINFELD; PANDIS, 2016);
- **Condições Ambientais:** Parâmetros ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, desempenham um papel crítico na dinâmica do incêndio e na dispersão de radionuclídeos. Temperaturas elevadas podem acelerar a propagação do fogo, enquanto a umidade pode influenciar a formação de aerossóis. A velocidade e a direção do vento são particularmente importantes, pois determinam a trajetória e a concentração das partículas radioativas liberadas, afetando áreas adjacentes ao depósito (TURNER, 1994).

Tem-se, portanto, que a análise de segurança de depósitos de rejeitos radioativos exige uma abordagem multidisciplinar, integrando conhecimentos de áreas como geologia, hidrologia, química, biologia e engenharia. A colaboração entre especialistas dessas diversas disciplinas é essencial para a construção de modelos holísticos e realistas que abranjam todos os aspectos relevantes para a segurança dos depósitos. Por exemplo, a interação entre a geologia local e a hidrologia é crítica para prever a migração de radionuclídeos no subsolo,

enquanto a química e a biologia são fundamentais para entender a interação dos contaminantes com o meio ambiente.

Algumas ferramentas computacionais são utilizadas na simulação de segurança de depósitos de rejeitos radioativos. Entre elas, destacam-se: *Monte Carlo N-Particle Transport Code* (MCNP): Empregado para simulações de transporte de partículas por métodos de Monte Carlo, é particularmente útil para avaliar a dispersão de radiação em diferentes cenários; e o *HotSpot Health Physics Codes*: software amplamente reconhecido por sua capacidade de fornecer estimativas conservadoras dos efeitos da radiação decorrentes da liberação atmosférica de materiais radioativos, sendo este último utilizado no presente trabalho.

2.9.1. Dispersão atmosférica

A dispersão atmosférica é um fenômeno complexo e dinâmico, intimamente relacionado ao transporte de efluentes pelos ventos e à difusão resultante da turbulência atmosférica. Esse processo desempenha um papel central na compreensão da distribuição de poluentes no ambiente, sendo fundamental para a avaliação de impactos ambientais e a formulação de estratégias de mitigação.

Modelos de dispersão atmosférica, permitem quantificar a taxa de lançamento de efluentes e prever a distribuição de suas concentrações na atmosfera. Esses modelos são essenciais para a gestão da qualidade do ar e a proteção da saúde pública, especialmente em cenários que envolvem a liberação de substâncias perigosas, como materiais radioativos.

A dispersão de poluentes na atmosfera é governada pela interação entre os ventos e a turbulência atmosférica. Conforme destacado por Seinfeld e Pandis (2016), a direção e a velocidade do vento são os principais fatores que determinam o transporte de efluentes, enquanto a turbulência influencia a difusão e a diluição dos poluentes.

Além desses fatores, outros processos físicos e químicos podem afetar a concentração e a distribuição dos contaminantes. Entre eles, destacam-se o decaimento radioativo, a deposição por esgotamento “*dry deposition*” e a eliminação por precipitação “*wet deposition*”. Esses processos são particularmente relevantes no caso de materiais radioativos, cuja meia-vida e toxicidade podem variar significativamente.

A presença de obstáculos naturais, como montanhas e florestas, ou artificiais, como edifícios e estruturas urbanas, também pode alterar o fluxo de ar e, conseqüentemente, a dispersão dos poluentes. Esses obstáculos podem criar zonas de turbulência adicional,

afetando a distribuição espacial das concentrações de contaminantes. Portanto, a modelagem da dispersão atmosférica deve integrar parâmetros meteorológicos e características topográficas para fornecer previsões precisas e confiáveis.

A aplicação de modelos de dispersão atmosférica é fundamental para a avaliação de riscos ambientais e a implementação de estratégias de mitigação. No contexto de instalações nucleares, por exemplo, esses modelos são essenciais para prever a dispersão de radionuclídeos em caso de acidentes ou liberações não planejadas.

Conforme destacado por Lapa e Campos (2010), a capacidade de prever a distribuição de materiais radioativos na atmosfera é crucial para a proteção da saúde pública e a tomada de decisões em emergências.

Dos diversos modelos matemáticos existentes para simular a dispersão atmosférica, cada um com suas particularidades e aplicações, destacam-se como os mais notáveis os modelos eulerianos, lagrangeanos e gaussianos, que diferem em sua abordagem e complexidade.

Os Modelos Eulerianos analisam a distribuição de poluentes em um campo fixo de coordenadas, resolvendo equações diferenciais que descrevem o transporte e a difusão dos contaminantes. Segundo Zhang *et al.* (2014), os modelos eulerianos são particularmente úteis para simulações em larga escala, como a dispersão de poluentes em regiões continentais ou globais. No entanto, eles exigem um alto poder computacional e dados meteorológicos detalhados.

Os Modelos Lagrangeanos, diferentemente dos modelos eulerianos, acompanham as trajetórias de partículas individuais em movimento com o vento. Essa abordagem é especialmente útil para simular a dispersão de poluentes em escalas menores, como em áreas urbanas ou industriais. Conforme destacado por Rojas *et al.* (2018), os modelos lagrangeanos são mais flexíveis e podem incorporar processos complexos, como a formação e a deposição de aerossóis.

Já os modelos gaussianos são amplamente utilizados em análises de dispersão atmosférica devido à sua simplicidade, eficiência e confiabilidade. Baseado na premissa de que a dispersão de contaminantes segue uma distribuição normal (gaussiana), esse modelo permite prever a concentração de materiais em função de parâmetros como distância, condições meteorológicas, altura da pluma, velocidade do vento e coeficientes de difusão.

Dentre os modelos gaussianos, destaca-se o denominado Pasquill-Gifford, desenvolvido na década de 1960, que tem por característica a aplicação em estudos de impacto

ambiental e no licenciamento de fontes emissoras, como chaminés industriais e usinas nucleares (TURNER, 1994).

Apesar de suas limitações, o modelo gaussiano é reconhecido por ser conservador, muitas vezes superestimando as concentrações, o que proporciona uma margem de segurança adicional. Essa característica é especialmente relevante em avaliações de riscos radiológicos, onde a precaução é prioritária, por esta razão, o modelo de Pasquill-Gifford será aplicado no presente trabalho, por meio do *software* HotSpot, apresentado a seguir.

2.9.2. Software HotSpot

O *software HotSpot Health Physics Codes*, desenvolvido pelo Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), foi projetado para auxiliar equipes de resposta a emergências oferecendo uma solução rápida e portátil para a avaliação de incidentes envolvendo substâncias radioativas, sendo particularmente relevante para a análise de segurança em instalações que manipulam ou armazenam materiais radioativos, como depósitos de rejeitos (LLNL, 2023).

A importância do *HotSpot* no contexto de incêndios em depósitos de rejeitos radioativos reside em sua capacidade de simular cenários complexos de dispersão de radionuclídeos, considerando fatores como a natureza do material liberado, as condições meteorológicas e a topografia local.

O *software* é composto por diversos módulos especializados, como “*Plume*”, “*Explosion*”, “*Fire*” e “*Resuspension*”, que permitem calcular a dispersão da radiação em diferentes cenários de liberação, incluindo liberações contínuas, explosões, incêndios de combustíveis e eventos de contaminação de áreas (SEINFELD; PANDIS, 2016). No caso específico de incêndios, o módulo “*Fire*” é particularmente útil, pois simula a dispersão de radionuclídeos resultantes da combustão de materiais radioativos, fornecendo estimativas das doses de radiação que podem ser recebidas pela população e pelo meio ambiente. Além disso, o HotSpot inclui ferramentas suplementares para a análise da dispersão de radionuclídeos específicos, como plutônio e urânio, o que o torna uma ferramenta versátil para a avaliação inicial de acidentes envolvendo materiais radioativos.

Essas funcionalidades são essenciais para a análise de segurança em depósitos de rejeitos, onde a combinação de materiais combustíveis e substâncias radioativas pode resultar em cenários de alto risco em caso de incêndio (ZHANG *et al.*, 2014). Os algoritmos

empregados no HotSpot são baseados em modelos gaussianos de dispersão atmosférica, que superestimam as doses de radiação para garantir uma abordagem conservadora. Esses modelos têm sido validados por meio de comparações com dados experimentais, demonstrando uma correspondência razoável com observações reais (TURNER, 1994).

A equação do modelo gaussiano utilizada pelo HotSpot permite determinar a concentração atmosférica de um gás ou aerossol em qualquer ponto do espaço. No entanto, o *software* assume que a origem da dispersão está localizada ao nível do solo, o que resulta em uma estimativa conservadora da concentração de radionuclídeos na atmosfera. Essa abordagem é especialmente útil para a análise de incêndios em depósitos de rejeitos, onde a liberação de materiais radioativos pode ocorrer próximo ao solo, aumentando o potencial de exposição para trabalhadores e comunidades vizinhas (ROJAS *et al.*, 2018).

A justificativa para o uso do software HotSpot no presente trabalho, em detrimento de outros sistemas de modelagem, deve-se a uma combinação de fatores que atendem às necessidades específicas da pesquisa. Em primeiro lugar, o HotSpot é uma ferramenta gratuita e de fácil acesso, o que elimina barreiras financeiras e técnicas para sua implementação. Além disso, ele utiliza modelos gaussianos consagrados, como o Pasquill-Gifford, reconhecidos por sua simplicidade, eficiência e confiabilidade em estudos de dispersão atmosférica.

A interface intuitiva deste *software* e capacidade de fornecer resultados rápidos são particularmente vantajosas para análises preliminares e cenários que exigem respostas ágeis, como em emergências envolvendo materiais radioativos. Outro aspecto relevante é o caráter conservador do modelo, que tende a superestimar as concentrações de contaminantes, garantindo uma margem de segurança adicional essencial em avaliações de risco.

2.10. APLICAÇÕES ENVOLVENDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO E ANÁLISE DE INCÊNDIO EM DEPÓSITO DE REJEITOS

A segurança nuclear e a gestão de rejeitos radioativos são temas de extrema relevância no cenário global, especialmente devido aos riscos associados à exposição à radiação ionizante e seus impactos na saúde humana e no meio ambiente. Diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar cenários de acidentes nucleares e radioativos, utilizando ferramentas computacionais para simular a dispersão de radionuclídeos e estimar os riscos associados.

A simulação computacional desempenha um papel crucial na modelagem de cenários complexos, como incêndios em instalações nucleares, permitindo a análise detalhada de

parâmetros críticos, como a propagação do calor, a dispersão de materiais radioativos e a eficácia dos sistemas de resfriamento. Por meio de modelos matemáticos avançados e softwares especializados, é possível simular condições extremas e avaliar a resposta de sistemas de segurança em tempo real. Isso inclui a previsão de falhas em equipamentos, a identificação de pontos críticos de superaquecimento e a avaliação de estratégias de contenção (SMITH; JONES, 2018).

Shamsuddin *et al.* (2017) investigaram os efeitos de um acidente nuclear hipotético em Manjung, Perak, utilizando o software HotSpot Health Physics Codes para simular a dispersão de radionuclídeos, com foco no Césio-137 (Cs-137) e no Iodo-131 (I-131). Os resultados indicaram que a dispersão poderia atingir até 80Km do local do acidente, alcançando a capital Ipoh. No entanto, a dose efetiva anual estimada permaneceu abaixo do limite de 1mSv, considerado seguro para a saúde humana e o meio ambiente. Esse estudo reforça a importância de ferramentas de modelagem para prever cenários de dispersão e avaliar riscos radiológicos.

De forma semelhante, Domingos *et al.* (2017) simularam um incêndio em um depósito de rejeitos radioativos, avaliando a dispersão atmosférica de nove radionuclídeos por meio de um modelo gaussiano implementado no HotSpot. Os resultados evidenciaram um aumento no risco radiológico, especialmente para mulheres e indivíduos recentemente expostos. Esse tipo de análise é crucial para a gestão de rejeitos radioativos, pois permite identificar grupos vulneráveis e implementar medidas de proteção específicas.

Rother *et al.* (2016) exploraram os riscos de desenvolvimento de câncer induzido por radiação ionizante. O trabalho utilizou o software HotSpot para modelagem de dispersão. Os autores destacaram a importância de uma abordagem multidisciplinar para avaliar riscos e garantir respostas eficientes em situações de crise. Esse estudo ressaltou ainda a necessidade de normas robustas que orientem a avaliação de riscos e a tomada de decisões em cenários de acidentes radiológicos.

Pirouzmand *et al.* (2015) realizaram uma avaliação detalhada das doses individuais e coletivas em torno da usina nuclear de Bushehr, no Irã, considerando tanto condições normais de operação quanto cenários de acidente com perda de refrigerante. A pesquisa aplicou o software HotSpot. Os resultados demonstraram que mesmo que a simulação tenha superestimado as doses em curtas distâncias, os valores permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pela Autoridade Reguladora Nuclear Iraniana (0,1 mSv/ano para o público e 50mSv/ano para trabalhadores).

Muswema *et al.* (2014) analisaram a dispersão atmosférica e a segurança radiológica em um cenário de acidente em um reator de pesquisa, utilizando o código MCNP para gerar o termo-fonte e o HotSpot para modelar a dispersão. Os resultados mostraram que as doses efetivas totais estavam dentro dos limites aceitáveis, mesmo em cenários de liberação de radioisótopos. Esse tipo de análise é essencial para reatores de pesquisa, que, embora menores em escala, também exigem avaliações de segurança detalhadas.

Anvari e Safarzadeh (2012) simularam um acidente hipotético no reator de pesquisa de Teerã, avaliando a dispersão de radionuclídeos e as doses recebidas pela população. Utilizando o HotSpot, os autores observaram que, mesmo em condições atmosféricas instáveis, as doses permaneceram abaixo dos limites anuais recomendados. Esse estudo destaca a importância de considerar diferentes condições meteorológicas na avaliação de riscos e na elaboração de normas de segurança.

A revisão da literatura demonstra que a modelagem de cenários de acidentes nucleares e radioativos, aliada à aplicação de normas de segurança, é essencial para a gestão de riscos radiológicos.

3. METODOLOGIA

3.1. APLICAÇÃO DO MODELO GAUSSIANO COM O SOFTWARE HOTSPOT

Com o objetivo de simular o impacto radiológico da ocorrência de um incêndio em um depósito de rejeito radioativos, foi empregado o *software* HotSpot, Versão 3.1.2. O algoritmo do código HotSpot utiliza o modelo gaussiano para a dispersão atmosférica que determina a concentração atmosférica integrada no tempo de um gás ou aerossol em qualquer ponto do espaço e que é dado pela seguinte equação:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] L \quad (3.1)$$

onde:

$C(x, y, z, H)$ = Concentração atmosférica integrada no tempo em um ponto (x, y, z)
e para uma altura efetiva de liberação H

Q = Atividade da fonte [Ci];

H = Altura efetiva de liberação [m];

λ = Constante de decaimento radioativo [s^{-1}];

x = Distância na direção do vento [m];

y = Distância na direção perpendicular ao vento [m];

z = Distância no eixo vertical [m];

σ_y = Desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção horizontal [m];

σ_z = Desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical [m];

u = Média da velocidade do vento na altura efetiva de liberação [m/s];

L = Altura da camada de inversão [m];

$DF(x)$ = Fator de depleção da pluma.

No modelo de dispersão e transporte gaussiano, os desvios padrões nas direções horizontal e vertical (σ_y e σ_z , respectivamente) são normalmente determinados a partir de curvas estabelecidas mostrando σ_y e σ_z como uma função da estabilidade atmosférica e distância a favor do vento. A estabilidade atmosférica é inferida a partir de dados meteorológicos medidos e / ou observados e é influenciada diretamente pela turbulência. Com a classe de estabilidade atmosférica determinada, o código HotSpot usa as equações fornecidas nas Tabelas 3.1.1 e 3.1.2 para estimar σ_y e σ_z considerando dois tipos de terreno: padrão (rural) e cidade (urbano).

Tabela 3.1.1- Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno padrão (HOMANN, 2014).

CLASSES DE ESTABILIDADE	σ_y (m)	σ_z (m)
A	$0,22x$	$0,20x$
	$\sqrt{1 + 0,0001x}$	
B	$0,16x$	$0,12x$
	$\sqrt{1 + 0,0001x}$	
C	$0,11x$	$0,080x$
	$\sqrt{1 + 0,0001x}$	
D	$0,08x$	$0,060x$
	$\sqrt{1 + 0,0001x}$	
E	$0,06x$	$0,030x$
	$\sqrt{1 + 0,0001x}$	
F	$0,04x$	$0,016x$
	$\sqrt{1 + 0,0001x}$	

Tabela 3.1.2- Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno urbano (HOMANN, 2014).

CLASSES DE ESTABILIDADE	σ_y (m)	σ_z (m)
A e B	$0,32x$	$0,24x$
	$\sqrt{1 + 0,0004x}$	
C	$0,22x$	$0,20x$
	$\sqrt{1 + 0,0004x}$	
D	$0,16x$	$0,14x$
	$\sqrt{1 + 0,0004x}$	
E e F	$0,11x$	$0,08x$
	$\sqrt{1 + 0,0004x}$	

Da análise da Tabela 3.1.2, verifica-se que classes de estabilidade A, B, E e F experimentam poucas variações no cenário urbano. Pode-se supor que as barreiras presentes no ambiente urbano contribuem para a manutenção do desvio padrão, não ocasionando alterações significativas na dispersão da pluma (HOMANN, 2014).

Segundo o Manual do *software* HotSpot, os códigos utilizados nas simulações são continuamente atualizados com o objetivo de incorporar as metodologias e os dados mais recentes e aprovados no contexto de conversão de dose radiológica. Para assegurar a correta implementação dos algoritmos que integram o HotSpot, especialmente após revisões e atualizações do software, é realizado um processo rigoroso de teste para cada módulo, baseado em uma biblioteca abrangente de estudos de caso previamente estabelecida (HOMANN, 2014).

Além disso, o software disponibiliza aos usuários a funcionalidade de realizar processos automatizados de verificação. Durante esse procedimento, cada estudo de caso é rigorosamente executado, com todos os parâmetros e padrões ajustados de maneira precisa aos valores indicados na documentação oficial do programa. Os resultados obtidos são submetidos a uma comparação sistemática com os resultados registrados anteriormente.

Essa metodologia assegura que o HotSpot tenha sido instalado adequadamente e que seus algoritmos e pressupostos estejam desempenhando suas funções conforme esperado, garantindo a consistência, a confiabilidade de suas operações.

3.2. TERMO DE FONTE

O termo de fonte de emissão radioativa foi caracterizado por um inventário de rejeitos compactados e de rejeitos imobilizados com resina exaurida dados pela Tabela 3.2.1. Para inserir os radionuclídeos listados foi considerada a biblioteca dada pela *Federal Guidance Report No. 13: Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides - FGR13*, de modo que, conforme recomendado pelo manual do HotSpot (HOMANN, 2014), os tipos de absorções devem seguir a publicação da ICRP 72, 1996.

Tabela 3.2.1- Inventário de radionuclídeos. (adaptado de Domingos, 2018)

REJEITOS COMPACTADOS PARA 700 TAMBORES		REJEITOS IMOBILIZADOS (RESINA EXAURIDA) PARA 1000 TAMBORES	
Radionuclídeo	Atividade (Bq)	Radionuclídeo	Atividade (Bq)
⁵⁸ Co	2,80E+11	⁵⁴ Mn	3,00E+12
⁶⁰ Co	2,00E+12	⁵⁸ Co	4,00E+12
¹³⁴ Cs	2,00E+11	⁶⁰ Co	2,00E+13
¹³⁷ Cs	1,10E+12	⁶³ Ni	2,00E+13
⁵⁴ Mn	1,8E+11	⁶⁵ Zn	6,00E+11
¹²⁴ Sb	1,00E+11	⁹⁰ Sr	4,50E+11
⁵⁹ Fe	7,00E+10	⁹⁰ Y	4,50E+11
⁹⁵ Zr	1,05E+11	^{110m} Ag	1,00E+12
		¹²² Sb	3,50E+12
		¹²⁴ Sb	1,00E+13
		¹²⁵ Sb	5,50E+12
		¹³⁴ Cs	1,00E+13
		¹³⁷ Cs	6,00E+13
		^{137m} Ba	6,00E+13

3.3. CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DE ENTRADA DO HOTSPOT

Juntamente com a definição do termo de fonte apresentada acima, arquivo da mistura, para que se possa realizar as simulações, o usuário do código HotSpot precisa inserir outros parâmetros relacionados com as características do incêndio e com as condições climáticas e atmosféricas, bem como a localização dos receptores e com as medidas radiológicas. Nesta dissertação foram consideradas as seis classes de estabilidade de Pasquill-Gifford pré-configuradas no HotSpot. Na listagem abaixo são mostradas as principais entradas de dados e configurações utilizadas neste trabalho:

- Modelo de Dispersão Atmosférica Pré-configurado: Incêndio genérico;
- Mistura com 22 nuclídeos: listados na Tabela 3.2.1;
- Altura física do fogo: 7 m;
- Raio de liberação: 20 m;
- Altura efetiva de liberação da pluma: 20 m;
- Direção do vento: oeste para leste;

- g) Classe de estabilidade: Todas as seis classes de estabilidade classificadas por Pasquill-Gifford: A, B, C, D, E e F;
- h) Altura do receptor: 1,50 m;
- i) Coordenadas de distância: Todas as distâncias são na linha central da pluma;
- j) Altura da camada de inversão: Sem camada de inversão;
- k) Tempo da amostra: 10 min;
- l) Taxa de respiração: $4,17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$;
- m) Velocidade deposição não-respirável: 8,0 cm/s;
- n) Contorno da isodose interior: 20 mSv;
- o) Contorno da isodose mediana: 10 mSv;
- p) Contorno da isodose exterior: 1 mSv;
- q) Dados de Conversão de Dose da FGR-13-Dose Efetiva Total (TED);
- r) Tipo do terreno: padrão (rural) e urbano (cidade).

O item “a”, modelo de dispersão atmosférica pré-configurado, corresponde à tela inicial do HotSpot, aba “*Models*”, Figura 3.3.1, neste trabalho, foi selecionada a opção “*General Fire*”, que corresponde a um cenário de acidente, não gerado por explosão ou ressuspensão da pluma radioativa, conforme proposto pela presente pesquisa.

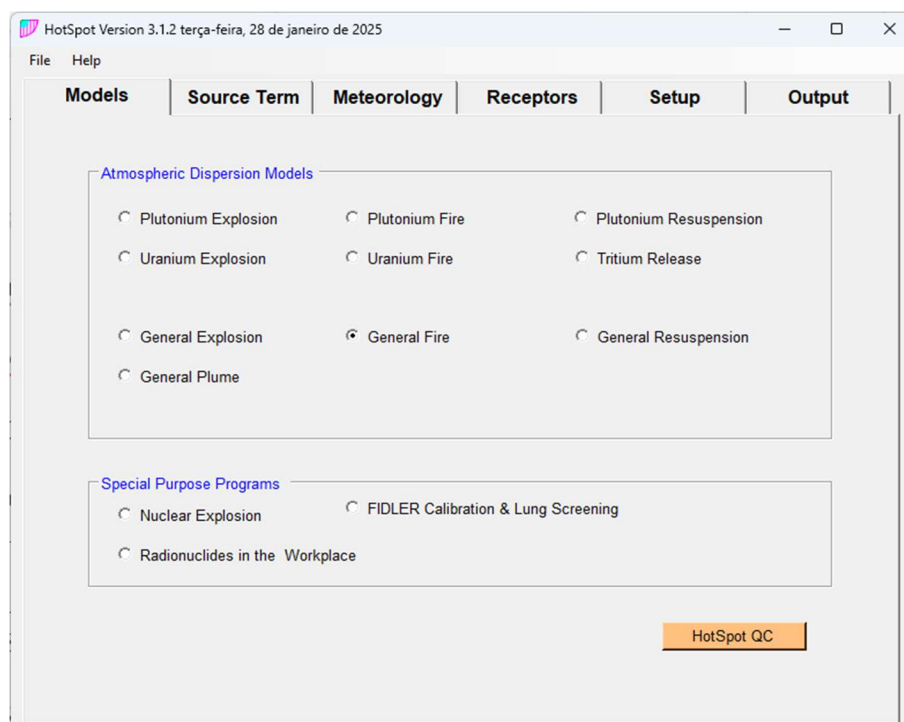


Figura 3.3.1 - Tela inicial do HotSpot com as opções de modelos de dispersão atmosféricas pré-configuradas e opção *General Fire* assinalada.

O item “b”, mistura com 22 nuclídeos, é configurado na aba “*Source Term*” mostrada na Figura 3.3.2, sendo na mesma tela definidos os itens “c” e “d” que correspondem as informações de altura física do fogo e raio de liberação, respectivamente.

Figura 3.3.2- Tela do HotSpot para configuração os dados do termo de fonte e informações sobre o incêndio.

A combinação das velocidades e das classes de estabilidade são dadas na Tabela 3.3.1.

Tabela 3.3.1- Condições meteorológicas utilizadas

VELOCIDADE (m/s)	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	CLASSE DE ESTABILIDADE
2,0	Sol alto no céu	A - Muito Instável
3,0	Sol alto no céu	B - Instável
3,0	Sol baixo no céu ou nublado	C - Levemente Instável
4,0	Sol baixo no céu ou nublado	D - Neutro
3,0	Noite	E - Levemente Estável
1,0	Noite	F - Muito Estável

Os itens “f”, direção do vento, oeste para leste, e “g”, classe de estabilidade, são configurados na aba “*Meteorology*” conforme Figura 3.3.3.

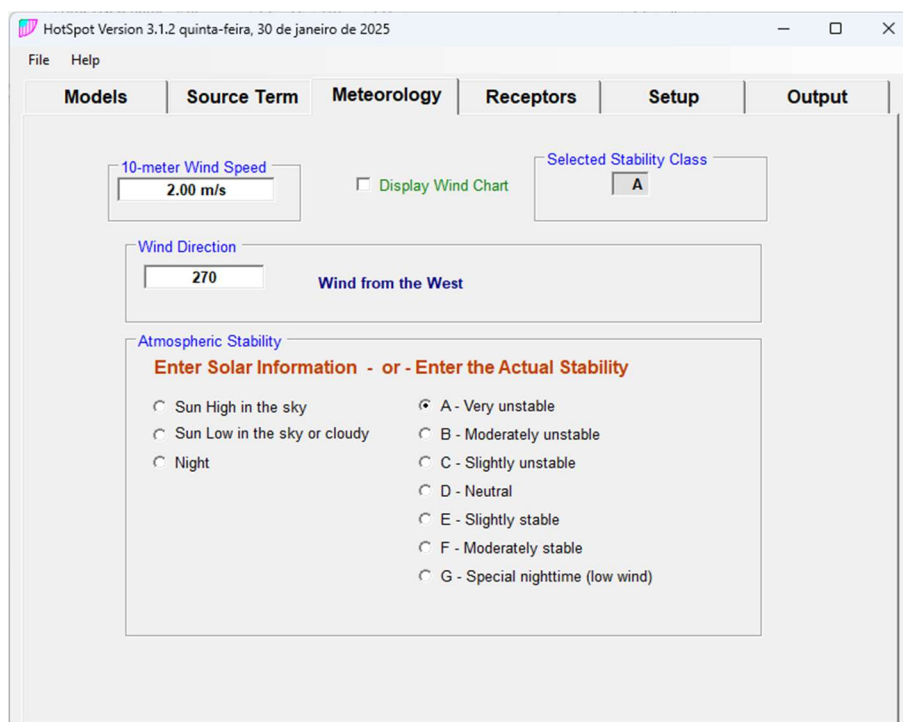


Figura 3.3.3- Tela do HotSpot para configuração dos dados de velocidade do vento em 10 metros e as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford.

O item “h” corresponde à altura do receptor, configurada na aba “*Receptors*” mostrada na Figura 3.3.4, onde se escolhe a altura do indivíduo em relação ao incêndio, sendo possível configurar até vinte posições para cada receptor e, de forma diferente dos valores padrões do HOTSPOT, foi escolhida uma variação pequena das posições dos receptores até 1km de distância.

Os itens de “j” até “r” correspondem a aba “*Setup*” mostrada na Figura 3.3.5 O contorno da isodose externa foi ajustada para 1 mSv, que corresponde com o limite anual da norma CNEN para o público.

Assim, foram simulados os seis cenários correspondente a cada uma das classes de estabilidade e os dois tipos de terrenos. Na Figura 3.3.6 é mostrada a tela da aba “*Output*” que permite configurar os arquivos de saída gerados em cada simulação. Esses arquivos estão na forma de tabelas e gráficos. Os gráficos que correspondem às curvas de contorno das doses podem ser em geometria simétrica com relação a linha central da pluma, que foi utilizado neste trabalho, ou em geometria de bússola.

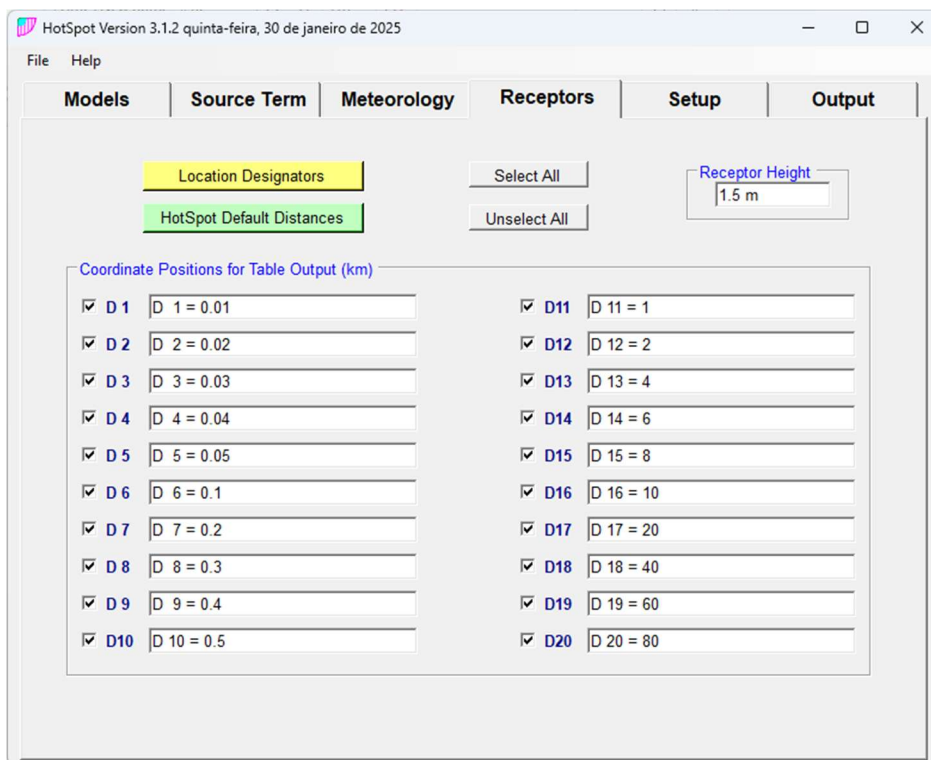


Figura 3.3.4- Tela do HotSpot para configurar a altura do receptor e as vinte posições em relação ao ponto de liberação da pluma.

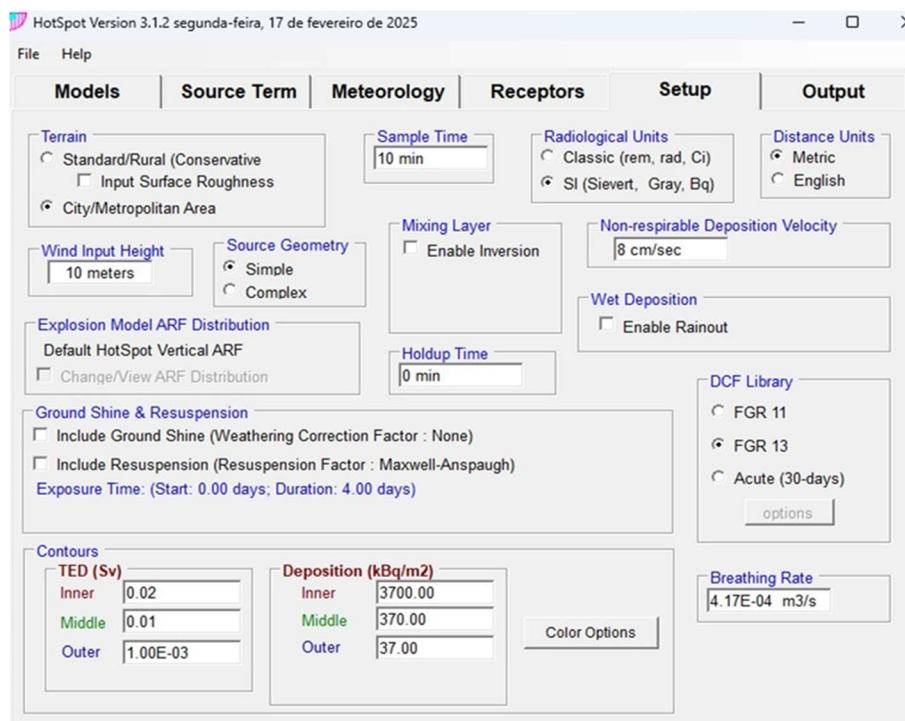


Figura 3.3.5- Tela do HotSpot para configuração de parâmetros, incluindo o valor para isodose externa.

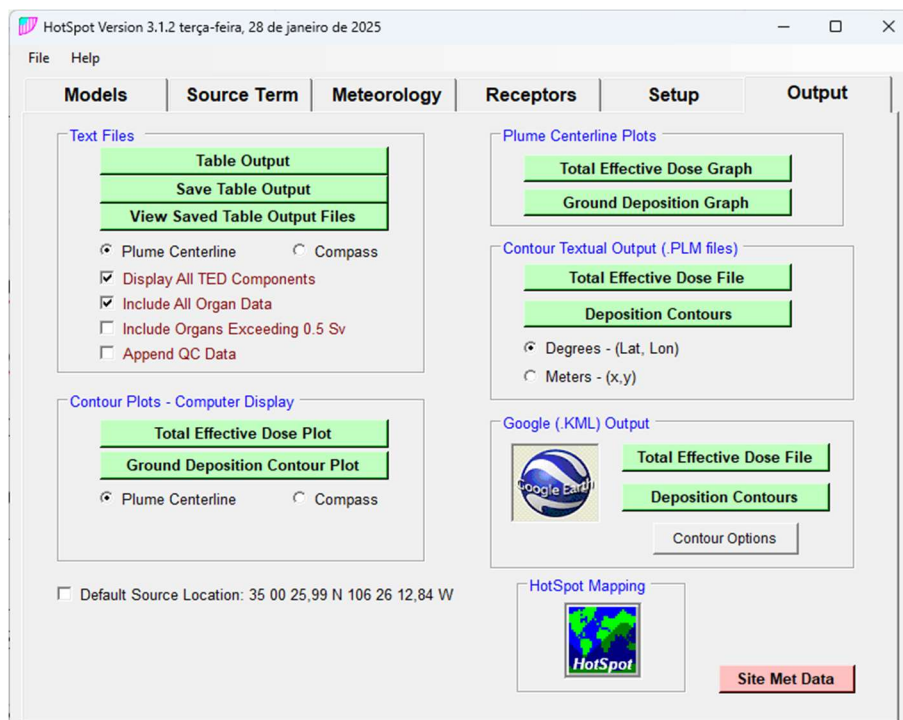


Figura 3.3.6- Tela do HotSpot para configuração dos arquivos gerados pelos dados de saída.

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser reproduzidos bastando para isso usar os valores de entrada e as configurações exatamente como apresentadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a definição do termo de fonte, das informações do fogo, das condições meteorológicas (classes de estabilidades) e outras configurações de entrada, a simulação no *software* HotSpot gera diversos dados de saída, sendo neste trabalho dado destaque a dose efetiva total (TED), em função da distância a partir do ponto de emissão da pluma, e as curvas de isodoses, que delimitam três regiões com diferentes intervalos das doses efetivas totais, ambas estimadas considerando os dois tipos de terrenos: urbano e rural.

4.1. DOSE EFETIVA TOTAL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

Neste estudo, foram realizadas simulações no *software* HotSpot para avaliar a distribuição da Dose Efetiva Total (TED) em função da distância a partir do ponto de emissão da pluma, considerando as seis classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford (A a F), Tabela 3.3.1, e dois tipos de terreno: urbano e rural, pelo tempo de exposição de 10 minutos. As simulações geraram dados de saídas, transpostos para Figuras e Tabelas apresentados a seguir, e permitiram analisar a variação da TED e comparar os resultados entre os dois cenários, considerando as condições meteorológicas específicas de cada classe de estabilidade.

Nas Figuras 4.1.1. a 4.1.6., o limite de dose correspondente a 20mSv para indivíduos ocupacionalmente expostos, foi destacado por um tracejado em vermelho e o limite de 1mSv para o público geral, indicado pelo tracejado em azul, (CNEN NN 3.01, 2024).

A análise dos dados mostrou que o terreno urbano tende a atenuar mais eficientemente a dispersão de radionuclídeos, resultando em valores menores de TED quando comparado ao terreno rural. Essa diferença pode ser atribuída a fatores como a presença de estruturas urbanas, que atuam como barreiras físicas, e a maior irregularidade do terreno, que influencia a dinâmica da dispersão atmosférica. Além disso, a interação entre as condições meteorológicas e o tipo de terreno desempenha um papel crucial na determinação da TED.

Por exemplo, na classe A, caracterizada por sol alto no céu e vento de 2 m/s, Tabela 3.3.1, os valores da TED para o terreno urbano foram inferiores aos do rural em todas as distâncias analisadas.

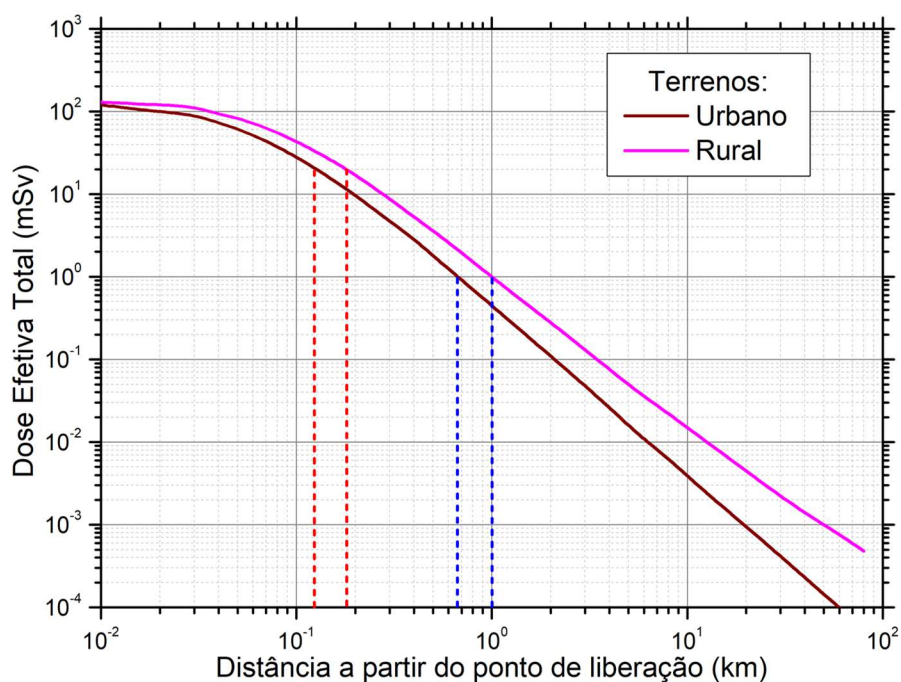


Figura 4.1.1- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade A.

Conforme ilustrado na Figura 4.1.1, o limite de dose de 20mSv para indivíduos ocupacionalmente expostos, foi atingido a aproximadamente 0,13 Km no terreno urbano e 0,18 Km no rural. Já o limite de 1mSv para o público geral, foi atingido a 0,67 Km metros no urbano e 1 Km no rural, sendo os dados estimados para dose efetiva total consolidados na Tabela 4.1.1.

Tabela 4.1.1- Classe de Estabilidade A - TED

Distância (km)	Terreno		Distância (km)	Terreno	
	Urbano	Rural		Urbano	Rural
0.01	1.20E-01	1.30E-01	1	4.50E-04	1.00E-03
0.02	1.00E-01	1.20E-01	2	1.10E-04	2.80E-04
0.03	8.80E-02	1.10E-01	4	2.60E-05	7.60E-05
0.04	7.30E-02	9.40E-02	6	1.10E-05	3.60E-05
0.05	6.10E-02	8.20E-02	8	6.20E-06	2.20E-05
0.1	2.80E-02	4.30E-02	10	3.90E-06	1.50E-05
0.2	9.60E-03	1.70E-02	20	9.50E-07	4.50E-06
0.3	4.70E-03	8.70E-03	40	2.30E-07	1.40E-06
0.4	2.80E-03	5.30E-03	60	1.00E-07	7.60E-07
0.5	1.80E-03	3.60E-03	80	5.80E-08	4.80E-07

Considerando a classe B, com sol alto no céu e vento de 3 m/s, Tabela 3.3.1, os limites de 20mSv e 1mSv foram atingidos a 0,094 Km e 0,55 Km no urbano, respectivamente, enquanto no rural esses valores foram de 0,20 Km e 1,2 Km (Figura 4.1.2). A maior velocidade do vento nesta classe promoveu maior dispersão da pluma radioativa, resultando em menores concentrações de radionuclídeos próximas à fonte de emissão, mas com impacto em uma região mais distante. Os dados obtidos nas simulações deste cenário, são apresentados na Tabela 4.1.2.

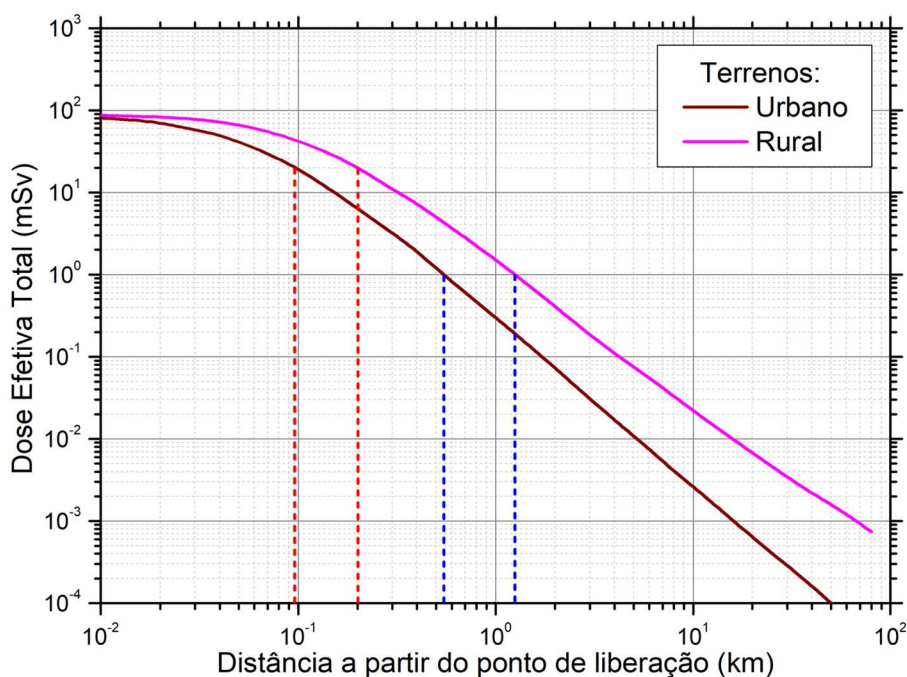


Figura 4.1.2- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade B.

Tabela 4.1.2- Classe de Estabilidade B - TED

Distância (km)	Terreno		Distância (km)	Terreno	
	Urbano	Rural		Urbano	Rural
0.01	8.10E-02	8.70E-02	1	3.00E-04	1.50E-03
0.02	7.00E-02	8.30E-02	2	7.30E-05	4.10E-04
0.03	5.80E-02	7.80E-02	4	1.70E-05	1.10E-04
0.04	4.90E-02	7.20E-02	6	7.50E-06	5.50E-05
0.05	4.10E-02	6.60E-02	8	4.10E-06	3.30E-05
0.1	1.90E-02	4.20E-02	10	2.60E-06	2.20E-05
0.2	6.40E-03	2.00E-02	20	6.40E-07	6.80E-06
0.3	3.20E-03	1.10E-02	40	1.60E-07	2.20E-06
0.4	1.90E-03	7.20E-03	60	6.90E-08	1.20E-06
0.5	1.20E-03	5.00E-03	80	3.90E-08	7.40E-07

Para a classe C, com sol baixo no céu ou céu nublado e vento de 3 m/s, Tabela 3.3.1, os limites para indivíduos ocupacionalmente expostos e público geral, destacados na Figura 4.1.3, foram atingidos a 0,13 Km e 0,83 Km no urbano, respectivamente e em 0,30 Km e 2,0 Km no cenário rural. A Tabela 4.1.3. apresenta os dados consolidados para TED para este cenário de simulado.

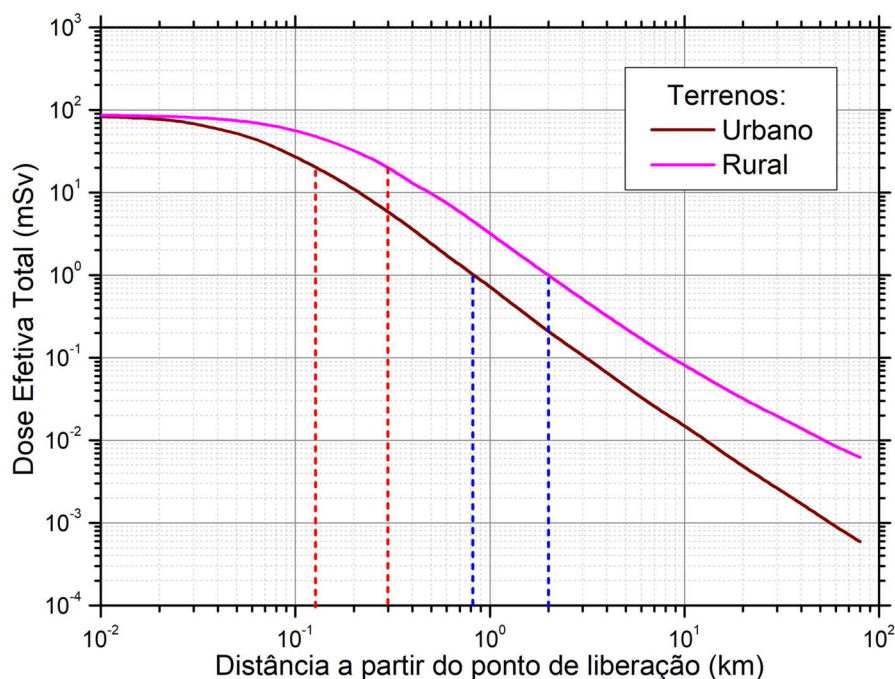


Figura 4.1.3- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade C

Tabela 4.1.3- Classe de Estabilidade C - TED

Distância (km)	Terreno		Distância (km)	Terreno	
	Urbano	Rural		Urbano	Rural
0.01	8.30E-02	8.60E-02	1	7.20E-04	3.20E-03
0.02	7.70E-02	8.40E-02	2	2.10E-04	1.00E-03
0.03	6.80E-02	8.10E-02	4	6.60E-05	3.20E-04
0.04	5.90E-02	7.80E-02	6	3.30E-05	1.70E-04
0.05	5.20E-02	7.40E-02	8	2.10E-05	1.10E-04
0.1	2.70E-02	5.60E-02	10	1.50E-05	8.10E-05
0.2	1.10E-02	3.20E-02	20	4.90E-06	3.20E-05
0.3	5.80E-03	2.00E-02	40	1.70E-06	1.40E-05
0.4	3.60E-03	1.30E-02	60	9.10E-07	8.50E-06
0.5	2.40E-03	9.70E-03	80	5.90E-07	6.20E-06

Na classe D, com sol baixo no céu ou céu nublado e vento de 4 m/s, Tabela 3.3.1, os limites de 20mSv e 1mSv foram atingidos a 0,14 Km e 1,2 Km no cenário urbano, enquanto no rural esses valores foram de 0,35 Km e 3,5 Km (Figura 4.1.4). A Tabela 4.1.4. apresenta os valores de TED para este cenário simulado.

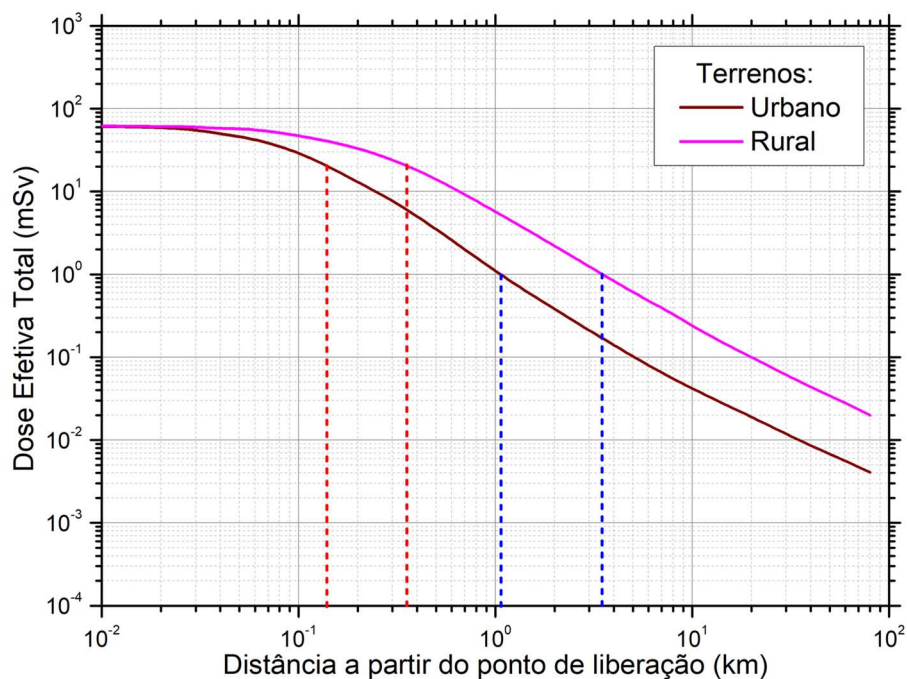


Figura 4.1.4- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade D.

Tabela 4.1.4- Classe de Estabilidade D - TED

Distância (km)	Terreno		Distância (km)	Terreno	
	Urbano	Rural		Urbano	Rural
0.01	6.10E-02	6.20E-02	1	1.10E-03	5.70E-03
0.02	5.90E-02	6.10E-02	2	3.80E-04	2.20E-03
0.03	5.50E-02	6.00E-02	4	1.40E-04	8.30E-04
0.04	5.00E-02	5.80E-02	6	8.00E-05	4.80E-04
0.05	4.60E-02	5.70E-02	8	5.50E-05	3.30E-04
0.1	2.90E-02	4.70E-02	10	4.20E-05	2.40E-04
0.2	1.30E-02	3.30E-02	20	1.90E-05	1.00E-04
0.3	7.70E-03	2.40E-02	40	8.60E-06	4.40E-05
0.4	5.00E-03	1.80E-02	60	5.60E-06	2.80E-05
0.5	3.50E-03	1.40E-02	80	4.10E-06	2.00E-05

Já na classe E, referente ao cenário noturno com vento de 3 m/s, Tabela 3.3.1, os limites de 20mSv e 1mSv foram atingidos a 0,31 Km e 3,2 Km no espaço urbano, e 0,63 Km e 7,4 km no rural, conforme Figura 4.1.5.

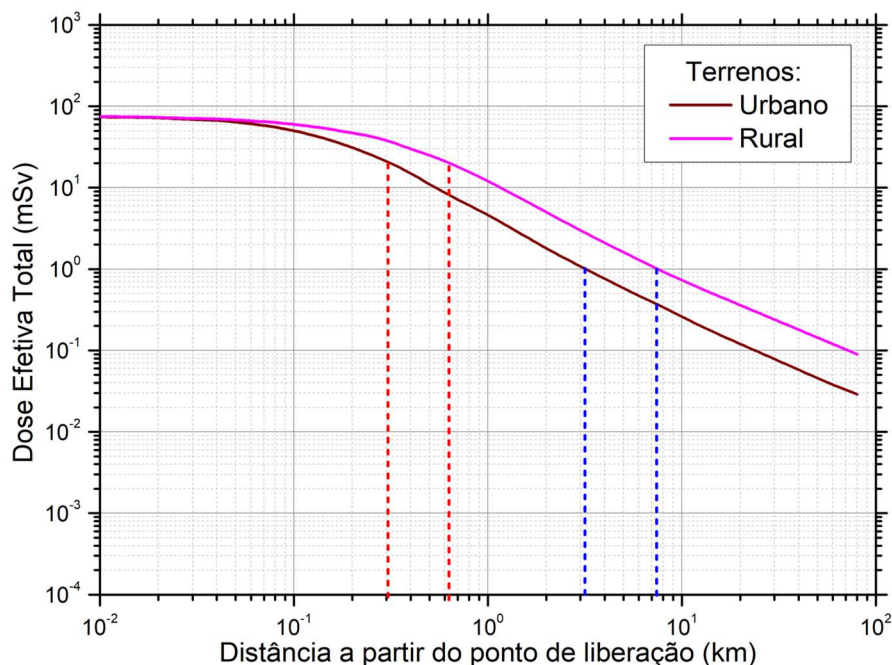


Figura 4.1.5- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade E.

A ausência de radiação solar e a velocidade moderada do vento resultaram em uma dispersão menos eficiente, com maiores concentrações de radionuclídeos próximas à fonte. Os dados da estimados para dose efetiva total foram consolidados na Tabela 4.1.5.

Tabela 4.1.5- Classe de Estabilidade E - TED

Distância (km)	Terreno		Distância (km)	Terreno	
	Urbano	Rural		Urbano	Rural
0.01	7.40E-02	7.50E-02	1	4.60E-03	1.20E-02
0.02	7.20E-02	7.30E-02	2	1.80E-03	5.00E-03
0.03	6.90E-02	7.10E-02	4	7.60E-04	2.10E-03
0.04	6.70E-02	7.00E-02	6	4.70E-04	1.30E-03
0.05	6.40E-02	6.80E-02	8	3.40E-04	9.30E-04
0.1	5.00E-02	6.00E-02	10	2.60E-04	7.30E-04
0.2	3.10E-02	4.70E-02	20	1.20E-04	3.60E-04
0.3	2.10E-02	3.80E-02	40	5.80E-05	1.80E-04
0.4	1.50E-02	3.00E-02	60	3.80E-05	1.20E-04
0.5	1.10E-02	2.50E-02	80	2.90E-05	9.00E-05

Por fim, na classe F, referente ao cenário noturno com vento de 1 m/s, Tabela 3.3.1, observou-se que os valores de TED foram superiores no rural em distâncias específicas (10 m, 20 m e 80 km). Nesse cenário, os limites de 20mSv e 1mSv foram atingidos a 0,69 Km e 7 km no ambiente urbano, e 2,6 Km e 24 km no cenário rural (Figura 4.1.6).

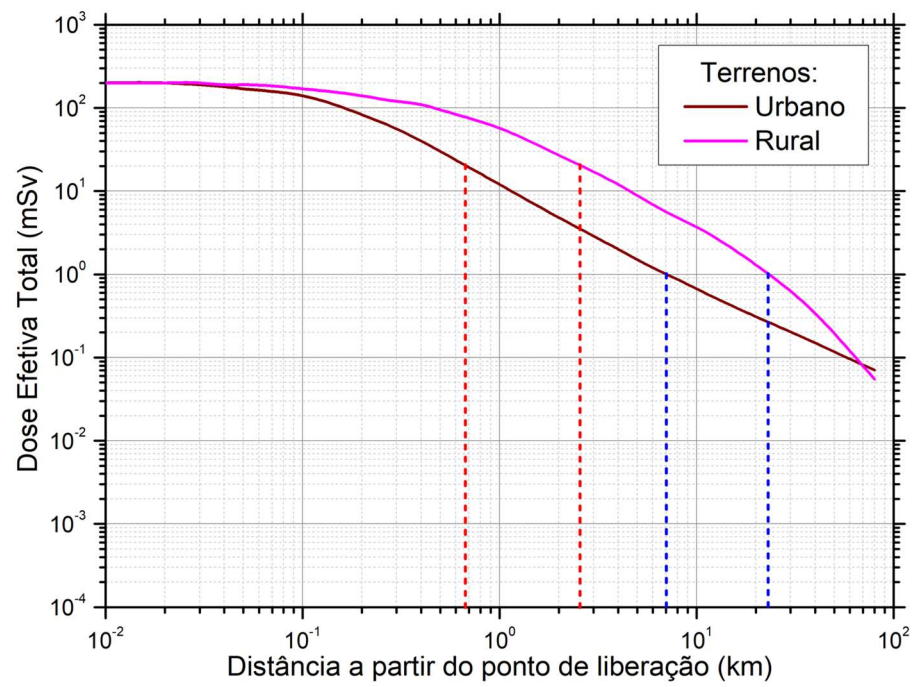


Figura 4.1.6- Variação da TED com a distância - classe de estabilidade F.

A baixa velocidade do vento e a ausência de radiação solar são fatores que favoreceram a concentração de radionuclídeos em áreas próximas à fonte. Os valores de TED para a condição meteorológica F foram consolidados na Tabela 4.1.6.

Tabela 4.1.6- Classe de Estabilidade F - TED

Distância (km)	Terreno		Distância (km)	Terreno	
	Urbano	Rural		Urbano	Rural
0.01	2.00E-01	2.00E-01	1	1.20E-02	5.70E-02
0.02	2.00E-01	2.00E-01	2	4.80E-03	2.70E-02
0.03	1.90E-01	2.00E-01	4	2.00E-03	1.20E-02
0.04	1.80E-01	1.90E-01	6	1.20E-03	6.90E-03
0.05	1.70E-01	1.90E-01	8	8.70E-04	4.80E-03
0.1	1.40E-01	1.70E-01	10	6.70E-04	3.70E-03
0.2	8.30E-02	1.40E-01	20	3.10E-04	1.30E-03
0.3	5.60E-02	1.20E-01	40	1.50E-04	3.40E-04
0.4	4.00E-02	1.10E-01	60	9.60E-05	1.20E-04
0.5	3.00E-02	9.50E-02	80	7.10E-05	5.50E-05

Com base nos resultados apresentados pode-se inferir que, independentemente da classe de estabilidade e do tipo de terreno, a dose efetiva total, diminui conforme se afasta do ponto de emissão da pluma. Nas Tabelas 4.1.1 a 4.1.6 foram apresentados os valores da TED obtidos na simulação de cada cenário, da análise destas Tabelas, verificou-se que as doses associadas a simulação do terreno urbano são, em sua maioria, menores quando comparada com a simulação com terreno rural, sendo exceção o caso para a classe de estabilidade F, na distância de 80 km, conforme Tabela 4.1.6.

Observou-se ainda que as classes de estabilidade atmosférica influenciam significativamente a dispersão dos radionuclídeos e na distribuição da TED, com maior dispersão em condições de sol alto e ventos fortes, como nas classes A, B e C.

Com relação aos limites de dose estabelecidos pela norma CNEN NN 3.01 (2024), estes foram atingidos em distâncias menores no terreno urbano, indicando maior vulnerabilidade em cenários de incêndio de depósito de rejeitos, próximos a áreas urbanas.

A Tabela 4.1.7, apresenta a consolidação dos dados obtidos na simulação da TED em função da distância de dispersão de pluma radioativa. A Tabela apresenta as distâncias para alcance dos limites de dose, considerando os terrenos rural e urbano, simulados a partir das seis classes de estabilidade apresentadas na Tabela 3.3.1.

Tabela 4.1.7- Consolidação dos resultados para simulação da TED para dispersão de pluma radioativa em seis classes de estabilidade meteorológicas, em terreno rural e urbano.

CLASSE DE ESTABILIDADE	URBANA		RURAL	
	Distância para atingir o limite de dose (Km)		Distância para atingir o limite de dose (Km)	
	20mSv	1 mSv	20mSv	1 mSv
A	0,13	0,67	0,18	1,00
B	0,094	0,55	0,20	1,20
C	0,13	0,83	0,30	2,0
D	0,14	1,10	0,35	3,50
E	0,31	3,20	0,63	7,40
F	0,69	7,00	2,60	240

4.2. CURVAS DE ISODOSES

O presente estudo também buscou analisar as curvas de isodose associadas a três níveis de dose: 20 mSv (isodose interna, representada em vermelho), 10 mSv (isodose mediana, representada em verde) e 1 mSv (isodose externa, representada em azul marinho). Esses valores correspondem, respectivamente, aos limites de dose ocupacional e público, conforme estabelecido pelas diretrizes da ICRP 103 (2007) e da norma CNEN NN 3.01 (2014). As curvas de isodose foram geradas para as seis classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford (A a F), conforme Tabela 3.3.1., considerando dois tipos de terreno: urbano e rural.

Para a classe de estabilidade A, considerando sol alto no céu e vento de 2 m/s, as áreas das curvas de isodose no terreno urbano, Figura 4.2.1, foram de 0,009 km² (interna), 0,019 km² (mediana) e 0,19 km² (externa). No terreno rural, Figura 4.2.2, essas áreas foram de 0,012 km² (interna), 0,027 km² (mediana) e 0,29 km² (externa). Comparativamente, as áreas no urbano corresponderam a 75%, 74% e 66% das áreas no rural, respectivamente.

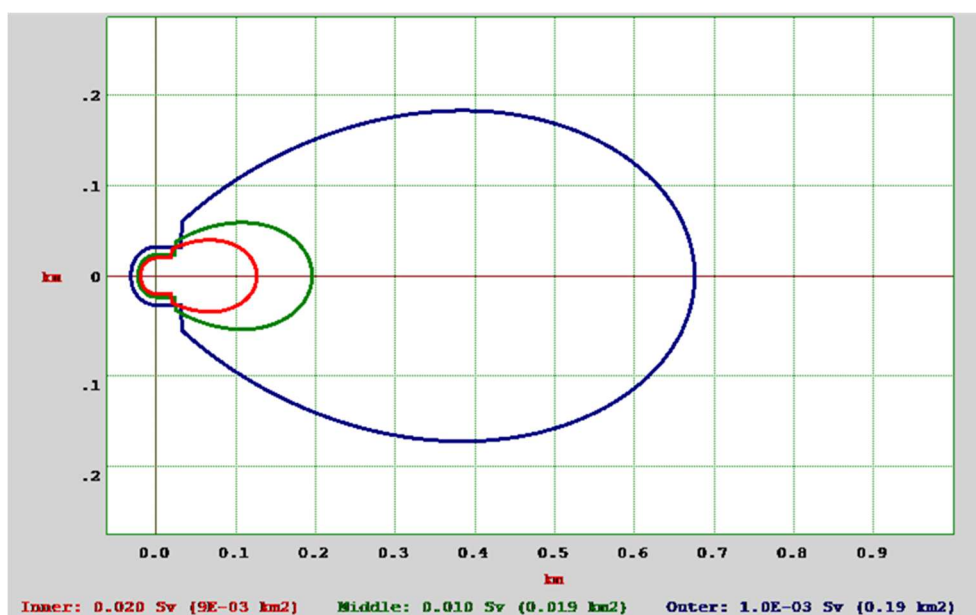


Figura 4.2.1- Curvas de isodose para a classe de estabilidade A, terreno urbano.

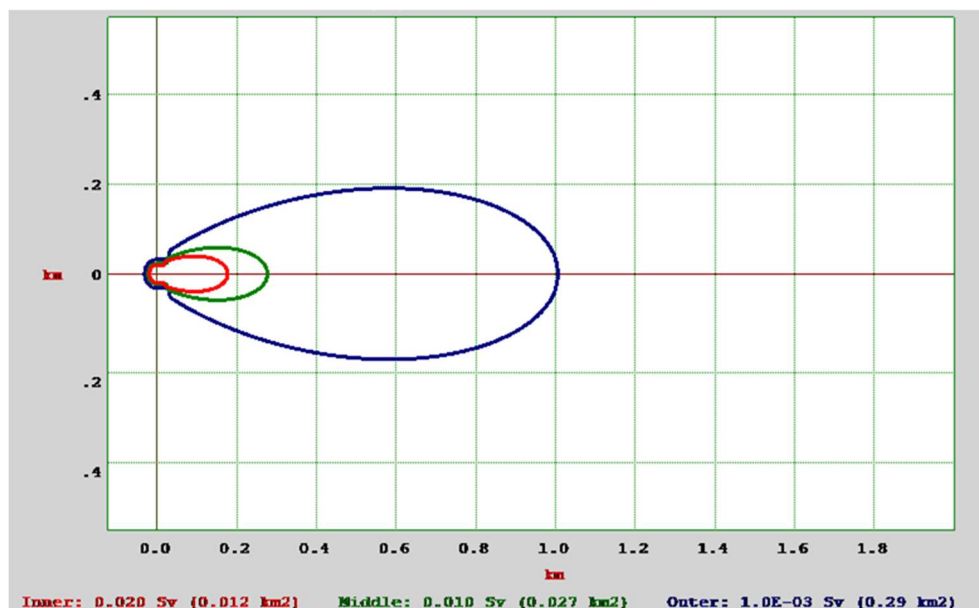


Figura 4.2.2- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade A, terreno rural.

Na classe de estabilidade B, com sol alto no céu e vento de 3 m/s, as áreas no terreno urbano, Figura 4.2.3, foram de 0,005 km² (interna), 0,012 km² (mediana) e 0,13 km² (externa). No cenário rural, Figura 4.2.4, os valores foram de 0,011 km² (interna), 0,026 km² (mediana) e 0,32 km² (externa). As áreas no espaço urbano representaram 45%, 46% e 41% das áreas no rural, respectivamente. A maior velocidade do vento nesta classe promoveu uma dispersão mais acentuada, reduzindo as concentrações de radionuclídeos próximas à fonte.

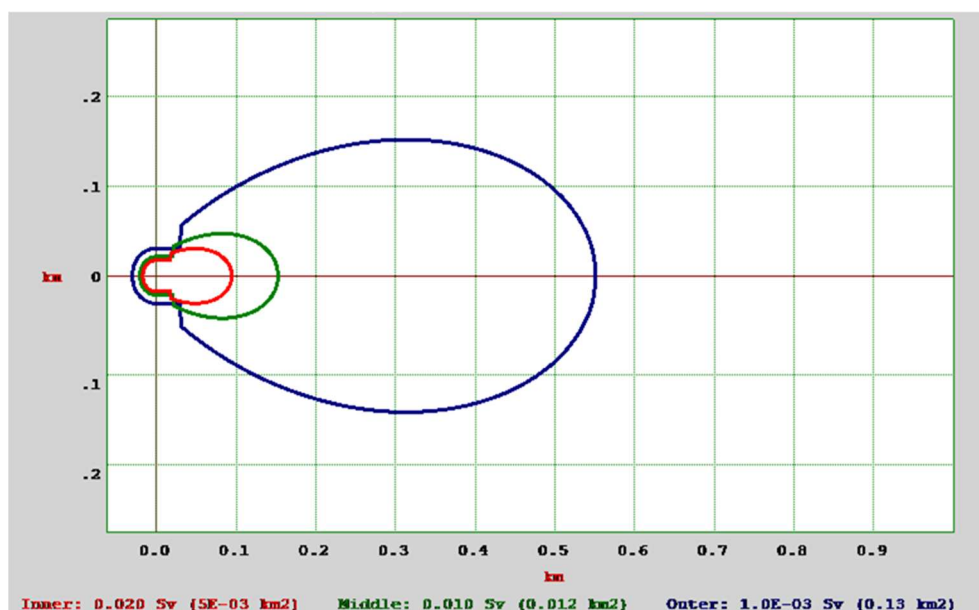


Figura 4.2.3- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade B, terreno urbano.

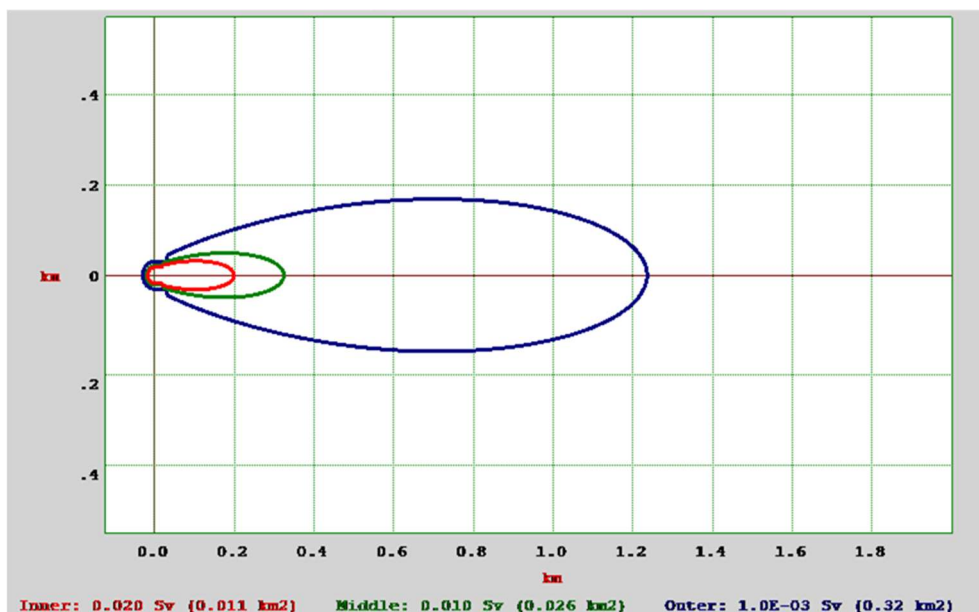


Figura 4.2.4- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade B, terreno rural.

Para a classe C, com sol baixo no céu ou céu nublado e vento de 3 m/s, as áreas no terreno urbano, Figura 4.2.5, foram de 0,007 km² (interna), 0,016 km² (mediana) e 0,19 km² (externa). No ambiente rural, Figura 4.2.6, os valores foram de 0,016 km² (interna), 0,040 km² (mediana) e 0,54 km² (externa). As áreas no espaço urbano corresponderam a 44%, 40% e 35% das áreas no rural, respectivamente.

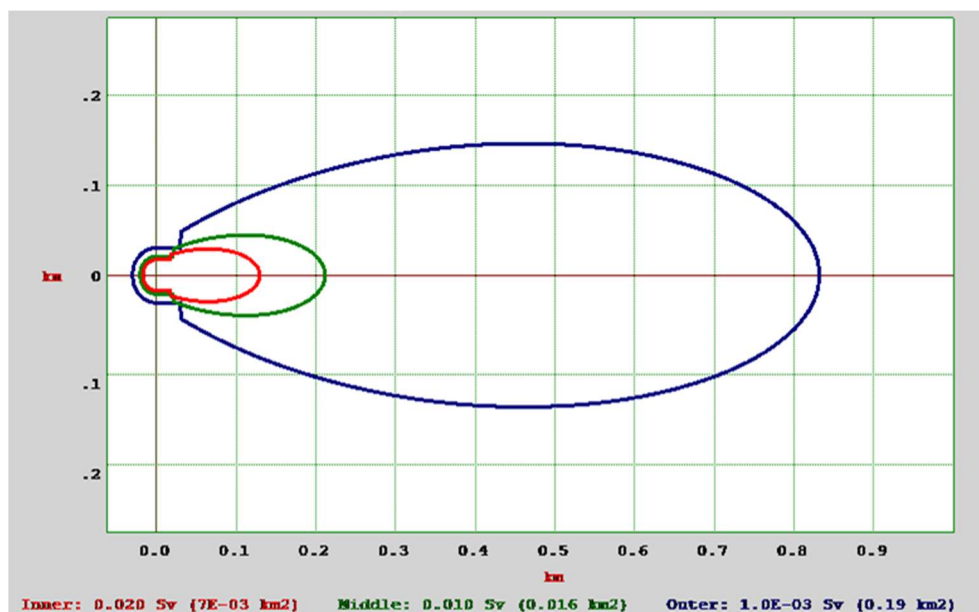


Figura 4.2.5- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade C, terreno urbano.

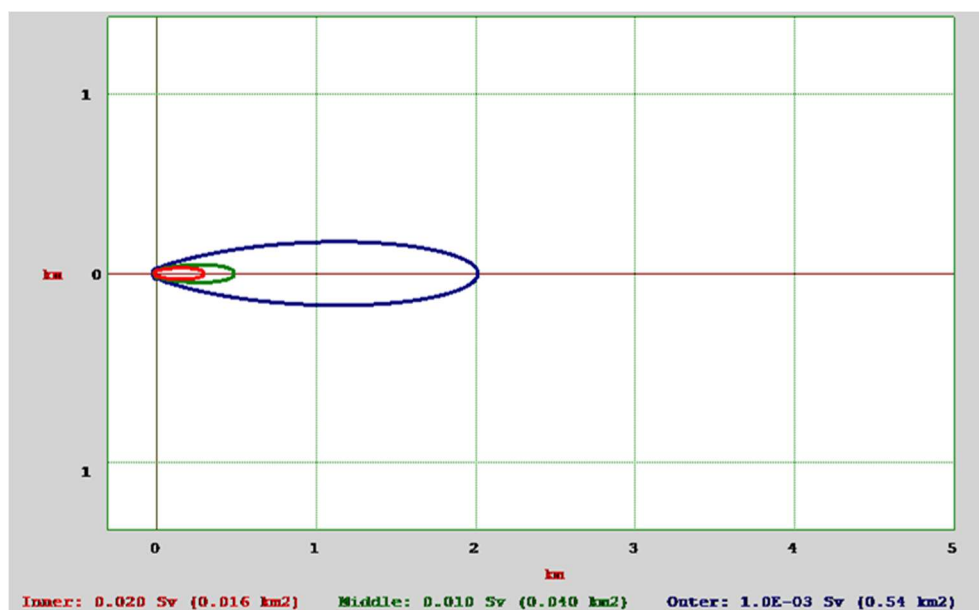


Figura 4.2.6- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade C, terreno rural.

Na classe D, com sol baixo no céu ou céu nublado e vento de 4 m/s, as áreas no terreno urbano, Figura 4.2.7, foram de 0,006 km² (interna), 0,016 km² (mediana) e 0,22 km² (externa). No rural, Figura 4.2.8, os valores foram de 0,015 km² (interna), 0,047 km² (mediana) e 1,0 km² (externa). As áreas no urbano representaram 40%, 34% e 22% das áreas no rural, respectivamente.

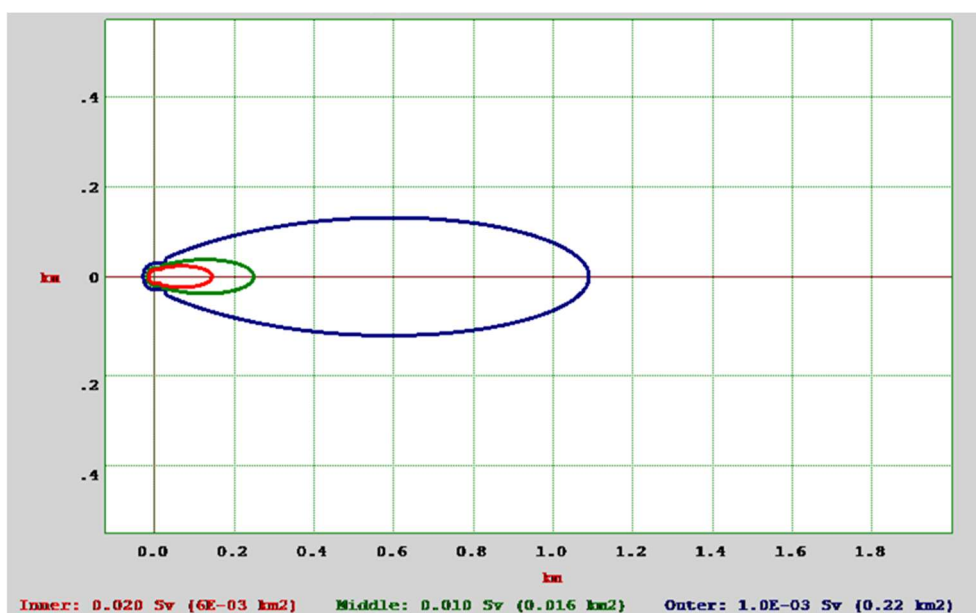


Figura 4.2.7- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade D, terreno urbano.

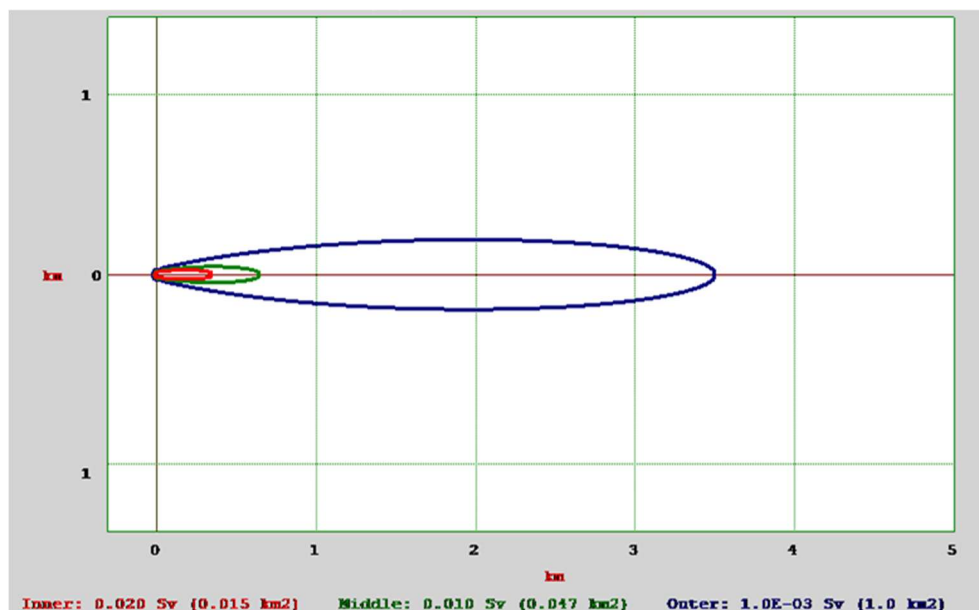


Figura 4.2.8- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade D, terreno rural.

Para a classe de estabilidade E, referente ao cenário noturno com vento de 3 m/s, as áreas no terreno urbano, Figura 4.2.9, foram de 0,015 km² (interna), 0,043 km² (mediana) e 0,95 km² (externa). No rural, Figura 4.2.10, os valores foram de 0,033 km² (interna), 0,10 km² (mediana) e 2,9 km² (externa). As áreas no urbano corresponderam a 45%, 43% e 33% das áreas no rural, respectivamente.

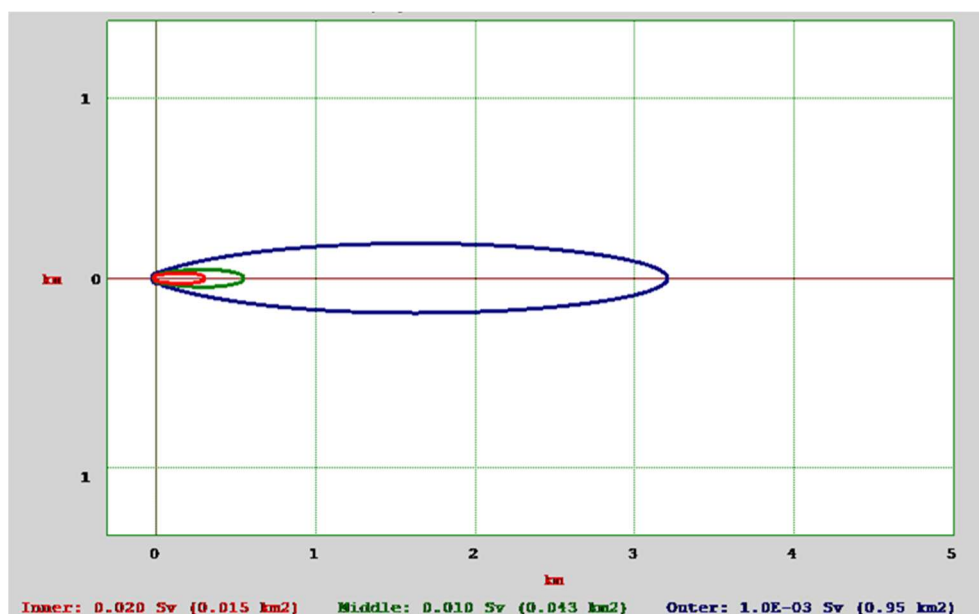


Figura 4.2.9- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade E, terreno urbano.

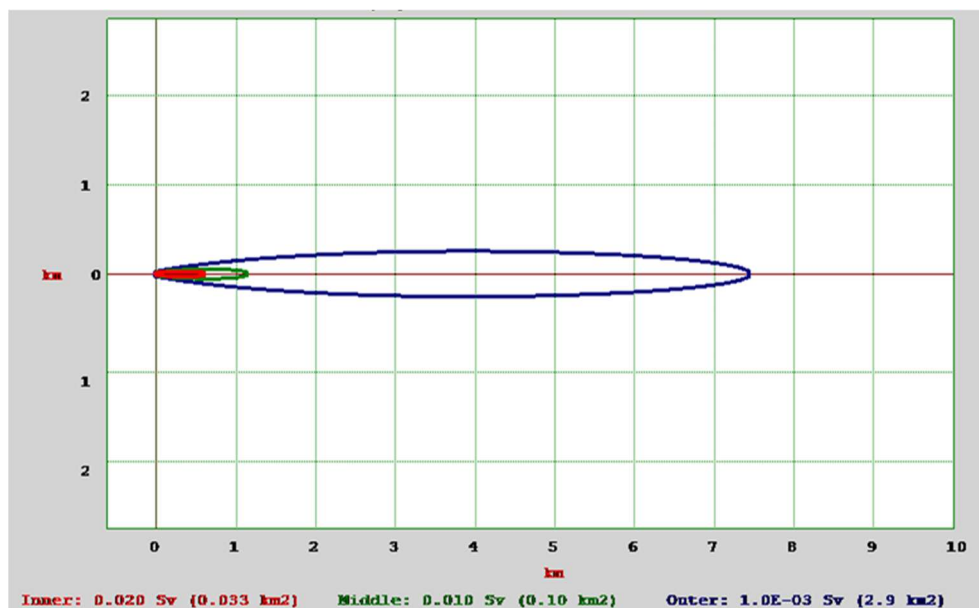


Figura 4.2.10- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade E, terreno rural.

Na classe F, referente ao cenário noturno com vento de 1 m/s, as áreas no terreno urbano, Figura 4.2.11, foram de 0,065 km² (interna), 0,16 km² (mediana) e 3,6 km² (externa). No rural, Figura 4.2.12, os valores foram de 0,30 km² (interna), 0,82 km² (mediana) e 17 km² (externa). As áreas no urbano representaram 22%, 20% e 21% das áreas no rural, respectivamente. A baixa velocidade do vento e a ausência de radiação solar favoreceram a concentração de radionuclídeos, especialmente no terreno rural.

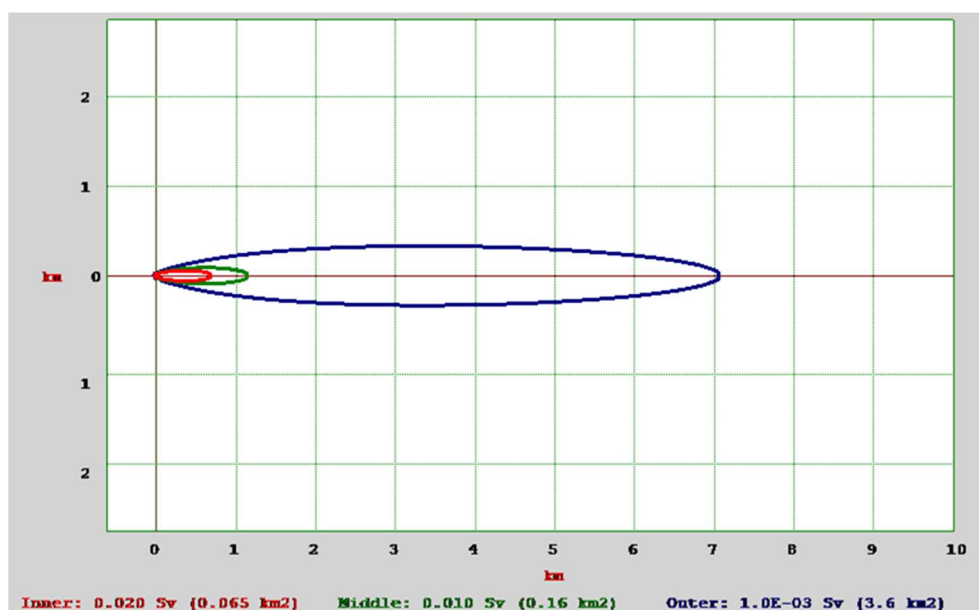


Figura 4.2.11- Curvas de isodoses para a classe de estabilidade F, terreno urbano.

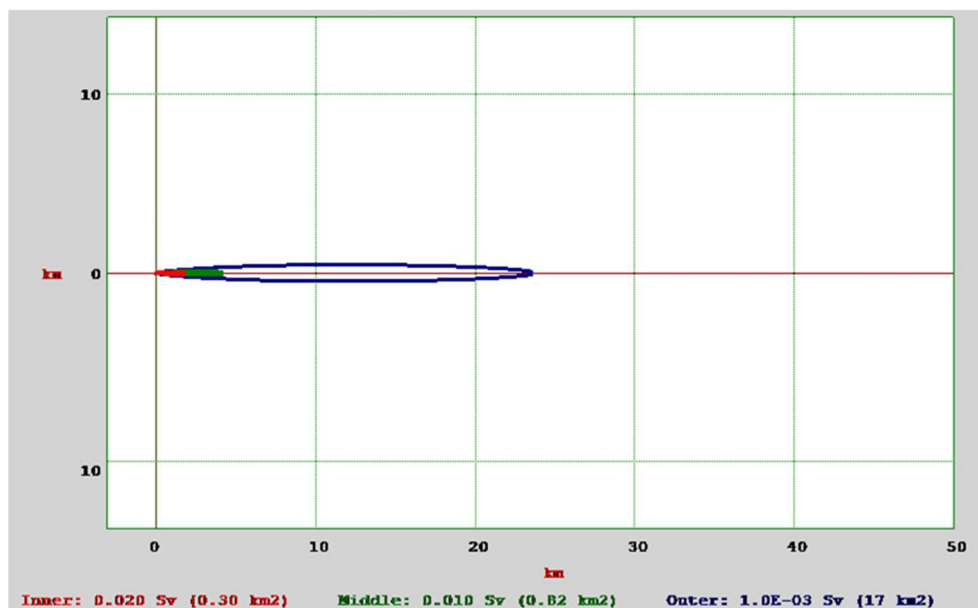


Figura 4.2.12- Curvas de isodose para a classe de estabilidade F, terreno rural.

De forma geral, observou-se que as áreas delimitadas pelas curvas de isodose são sistematicamente maiores no terreno rural em comparação ao urbano. Essa diferença pode ser atribuída principalmente à maior irregularidade do solo e à presença de estruturas urbanas, que atuam como barreiras físicas, reduzindo a dispersão da pluma radioativa no cenário urbano. Além disso, as condições meteorológicas específicas de cada classe de estabilidade atmosférica influenciaram significativamente a extensão das áreas de isodose, com variações notáveis dependendo da intensidade da radiação solar e da velocidade do vento.

Dentre os cenários analisados, a classe de estabilidade F, caracterizada por ventos fracos e condições noturnas, resultou em uma menor amplitude de alcance da pluma radioativa tanto no terreno urbano quanto no rural. Nessas condições, a baixa velocidade do vento e a ausência de radiação solar favoreceram a concentração de radionuclídeos próximos à fonte, reduzindo a dispersão e aumentando as áreas de isodose nas proximidades. Esse comportamento foi mais evidente no terreno rural, onde a ausência de barreiras físicas permitiu uma maior concentração da dose em áreas específicas.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar a dispersão de plumas radioativas em cenários de incêndio em depósitos de rejeitos radioativos, utilizando o *software* HotSpot para simular diferentes condições atmosféricas e tipos de terreno. Os resultados obtidos destacam a importância de considerar as interações entre fatores meteorológicos, topográficos e demográficos na avaliação de riscos radiológicos e na elaboração de estratégias de proteção e resposta a emergências.

As simulações realizadas demonstraram que as classes de estabilidade atmosférica desempenham um papel crucial na dispersão de radionuclídeos. Classes mais instáveis (A, B e C), caracterizadas por sol alto e ventos fortes, promoveram uma dispersão mais acentuada da pluma radioativa, resultando em menores concentrações de radionuclídeos próximas à fonte, mas com maior alcance da pluma.

Por outro lado, classes mais estáveis (D, E e F), associadas a ventos fracos e condições noturnas, favoreceram a concentração de radionuclídeos em áreas próximas à fonte, aumentando a Dose Efetiva Total (TED) nessas regiões.

A comparação entre os cenários urbano e rural revelou que o terreno urbano, devido à maior irregularidade do terreno e à presença de estruturas físicas, atenuou significativamente a dispersão da pluma, resultando em áreas de isodose menores. No entanto, essa característica não necessariamente torna o cenário urbano mais seguro, uma vez que a maior densidade demográfica nas cidades pode expor um número maior de pessoas aos riscos associados à radiação.

Em contraste, o terreno rural permitiu uma dispersão mais ampla, mas com menores concentrações de radionuclídeos, o que pode facilitar a implementação de medidas de mitigação em áreas menos populosas, tornando esse tipo de local mais adequado para a instalação de depósitos de rejeitos radioativos.

Os limites de dose estabelecidos pela CNEN (2014) foram atingidos em distâncias significativamente menores no terreno urbano, reforçando a necessidade de medidas de proteção radiológica mais rigorosas em áreas urbanas. Além disso, a exceção observada na classe F, com valores de TED superiores no rural em distâncias específicas, destacou a

importância de análises detalhadas e contextualizadas, considerando a complexa interação entre fatores meteorológicos, topográficos e de dispersão.

Os resultados deste trabalho fornecem subsídios valiosos para a elaboração de planos de emergência e medidas de proteção radiológica, contribuindo para a segurança de trabalhadores e do público em geral. A compreensão detalhada dos processos de dispersão e dos impactos associados é fundamental para a gestão segura e sustentável de rejeitos radioativos, garantindo a proteção da saúde pública e a preservação do meio ambiente.

O modelo gaussiano que foi utilizado na simulação deste trabalho tem caráter conservativo, isso significa que o modelo tende a fornecer estimativas que podem ser mais elevadas do que as concentrações reais de exposição no ambiente.

Essa abordagem conservativa é intencional, uma vez que o objetivo principal é garantir a segurança pública e ambiental. Ao superestimar as doses de radiação, o modelo gaussiano assegura que as medidas de proteção e mitigação sejam adequadas e abrangentes, mesmo em cenários com incertezas significativas.

A superestimação das doses não representa falhas no modelo, mas sim uma medida de precaução essencial para evitar subestimativas que poderiam comprometer tanto a saúde pública quanto o meio ambiente. Dessa forma, os resultados obtidos por meio do modelo gaussiano oferecem uma margem de segurança adicional, permitindo que as autoridades responsáveis adotem medidas preventivas e corretivas com maior confiança e embasamento.

Os impactos observados nos cenários analisados não desabonam a área nuclear, muito menos as técnicas de gerenciamento de rejeitos radioativos. Pelo contrário, a realização deste tipo de estudo reforça o compromisso do setor nuclear com a sociedade, demonstrando sua constante busca pelo aprimoramento das operações e pela transparência na gestão de riscos. Ao utilizar simulações computacionais para analisar cenários de acidentes, a área nuclear não apenas se antecipa a possíveis eventos adversos, mas também se torna mais segura e preparada para a mitigação eficaz de riscos. Essa abordagem proativa evidencia o comprometimento do setor com a segurança, a proteção da saúde pública e a preservação do meio ambiente, consolidando a energia nuclear como uma opção responsável e sustentável para o futuro.

Logo, este trabalho contribui para o avanço das boas práticas de gestão de rejeitos radioativos e para o fortalecimento das políticas de segurança nuclear. Os resultados obtidos fornecem subsídios valiosos para a elaboração de planos de emergência e estratégias de mitigação, visando à proteção da saúde pública e à preservação do meio ambiente. Espera-se que os achados deste estudo possam subsidiar a tomada de decisões por parte de autoridades e

gestores, promovendo um manejo mais seguro e sustentável de resíduos radioativos.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um aspecto relevante a ser explorado em pesquisas futuras é a análise de diferentes cenários meteorológicos, com destaque para a ocorrência de chuva, que pode influenciar significativamente a dispersão das plumas radioativas. A precipitação pluviométrica tem o potencial de alterar a trajetória das plumas e aumentar a deposição de materiais radioativos no solo, o que pode gerar impactos críticos para a saúde pública e o meio ambiente.

A incorporação dessas variáveis meteorológicas nas simulações permitirá uma avaliação abrangente dos possíveis efeitos em condições climáticas diferentes das que foram abordadas na presente pesquisa, ampliando o conhecimento acerca do tema para assim contribuir para a tomada de decisões mais assertivas em diferentes contextos.

Outro ponto importante é a validação dos dados obtidos por meio de simulações, utilizando bases de dados provenientes de casos experimentais ou situações reais de emergência. Essa abordagem permitirá aprimorar a precisão dos modelos simulados, além de possibilitar ajustes e refinamentos nos parâmetros utilizados.

No entanto, é importante destacar que a validação, embora configure uma proposta interessante e enriquecedora, não desabona as simulações realizadas com o *software* Hotspot, uma vez que o software utiliza em seu banco de dados um conjunto de informações baseadas em dados reais. Contudo, o pesquisador poderá complementar as análises ao incorporar dados meteorológicos específicos da região estudada, enriquecendo as entradas do modelo e aprimorando ainda mais os resultados obtidos. A integração desses dados empíricos fortalecerá a robustez das simulações, garantindo maior alinhamento com cenários reais e ampliando a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos.

Como desdobramento deste estudo, recomenda-se ainda a realização de análises mais detalhadas sobre os impactos das doses de radiação em diferentes tecidos biológicos. Essa abordagem permitiria avaliar os efeitos específicos da exposição radioativa em órgãos e sistemas, com a finalidade de identificar possíveis doenças decorrentes de cenários de acidente, como câncer, disfunções orgânicas e outras patologias associadas à radiação ionizante.

A incorporação de modelos biológicos de dose tecidual, aliada a simulações computacionais, poderia fornecer informações valiosas sobre a vulnerabilidade de populações expostas e subsidiar a elaboração de estratégias de prevenção e tratamento mais direcionadas.

REFERÊNCIAS

- ALBERTS, B. et al. *Biologia Molecular da Célula*. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2022.
- ANDERSON, P.; BROWN, T.; LEE, K. Advanced Simulation Techniques for Nuclear Waste Management. *International Journal of Radiation Safety*, v. 12, n. 2, p. 89-107, 2020.
- ANVARI, A.; SAFARZADEH, S. Simulation of a hypothetical accident in the Tehran Research Reactor. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 113, p. 1-7, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12693: Sistemas de proteção por extintores de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 45 p.
- CARTER, L. J. *Nuclear Imperatives and Public Trust: Dealing with Radioactive Waste*. Washington, DC: Resources for the Future, 2010.
- CASTRO, R. C. Cálculo de dose equivalente em órgãos de pacientes devido a fotonêutrons gerados em aceleradores lineares clínicos. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Nuclear, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- COMISSÃO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NE 6.06: Resolução CNEN nº 014, de 1989. Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos. Rio de Janeiro, 1989.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 3.01: Resolução CNEN nº 323, de 2024. Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação. Rio de Janeiro, 2024.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 5.01: Resolução CNEN nº 271, de 2021. Regulamento para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos. Rio de Janeiro, 2021.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 6.02: Resolução CNEN nº 293, de 2022. Licenciamento de Instalações Radiativas. Rio de Janeiro, 2022.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 6.09: Resolução CNEN nº 012, de 2002. Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro, 2002.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 8.01: Resolução CNEN nº 167, de 2014. Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro, 2014.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 8.02: Resolução CNEN nº 168, de 2014. Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro, 2014.

COOPER, G. M.; HAUSMAN, R. E. A Célula: Uma Abordagem Molecular. 8. ed. Porto Alegre: Artmed, 2023.

CRUZ, D. T.; ROCHA, G. A.; VIEIRA, L. B. Uso das radiações ionizantes na indústria: a contribuição. Núcleo do Conhecimento, 2024. DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/livros/4338. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/livros/c-ce-t-m-1-q-2024/uso-das-radiacoes>. Acesso em: 14 fev. 2025.

DOMINGOS, D. et al. Simulation of fire in a radioactive waste repository. Radiation Protection Dosimetry, v. 173, p. 1-8, 2017.

ELETRONUCLEAR. Critérios de segurança adotados para as usinas nucleares Angra 1, Angra 2 e Angra 3. Rio de Janeiro: Eletrobras Eletronuclear, 2011. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/QuemSomos/Governanca/Documents/Relat%C3%B3rios%20e%20Balan%C3%A7os/Relat%C3%B3rios%20de%20Seguran%C3%A7a/12052011RSFA.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.

EMBRAPA. Irradiação de alimentos: tecnologia que aumenta a vida útil e a segurança dos produtos, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/tipos-de-processos/irradiacao>. Acesso em: 14 fev. 2025

FAKTOPEDIA.PL, 2021. Disponível em: <https://faktopedia.pl/543144>. Acesso em: 30 jan. 2025.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. Gerenciamento de Rejeitos Radioativos: Uma Abordagem Integrada. 2005.

HALL, E. J.; GIACCIA, A. J. Radiobiology for the Radiologist. 8th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2019.

HARRIS, J. et al. Emergency Response in Nuclear Facilities: Case Studies and Best Practices. Radiation Protection Journal, v. 18, n. 1, p. 33-47, 2017.

HOMANN, Camila Tavares. Avaliação dos efeitos urbanos sobre circulações de mesoescala em função da expansão territorial da Região Metropolitana de São Paulo. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Safety Standards Series No. GSG-1, Classification of Radioactive Waste. Vienna, 2009.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Safety Standards for the Management of Radioactive Waste. Vienna: IAEA Publications, 2014.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Only One Earth: 4 Ways Nuclear Science is Helping the Environment. IAEA, 2022. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/only-one-earth-4-ways-nuclear-science-is-helping-the-environment>. Acesso em: 14 fev. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products. Vienna: IAEA, 2008. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub>

1313_web.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.

JOHNSON, P. et al. Health Impacts of Plutonium Exposure: A Review of Rocky Flats Workers. Radiation Protection Dosimetry, v. 178, n. 2, p. 89-97, 2018.

JOHNSON, P.; MARTINEZ, R. Waste Isolation Pilot Plant (WIPP): Lessons Learned from the 2014 Fire. Journal of Nuclear Materials Management, v. 44, n. 3, p. 22-35, 2016.

JUNQUEIRA, L. C.; CARNEIRO, J. Biologia Celular e Molecular. 11. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2020.

K-SPAR INC., 2025. Disponível em: https://www.kspar.net/projects/rocky_flats. . Acesso em: 30 jan. 2025.

LAPA, N.; CAMPOS, T. P. R. Gestão de Rejeitos Radioativos: Fundamentos e Aplicações. 2010.

LLNL. HotSpot Health Physics Codes. Lawrence Livermore National Laboratory, 2023. Disponível em: <https://www.llnl.gov/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

LODISH, H. et al. Biologia Celular e Molecular. 9. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021.

LOPES, T. J. Materiais Utilizados em Blindagens Radiológicas na Indústria e Medicina Nuclear: Revisão sobre Chumbo, Concreto, Ferro e Alumínio. In: 21º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas (ENEMET), São Paulo, 2023.

MARTIN, A.; HARBISON, S. An Introduction to Radiation Protection. 7th ed. CRC Press, 2018.

MCCREADY, V. R. Radioiodine – the success story of Nuclear Medicine: 75th Anniversary of the first use of Iodine-131 in humans. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, vol. 44, no. 2, 2017, pp. 179–182.

MEDVEDEV, Z. Nuclear Disaster in the Urals. New York: W.W. Norton & Company, 1979.

MILLER, K. L.; STEVENS, D. L.; JONES, R. M. Modeling and Simulation of Radiological Dispersal Events. Springer, 2017.

MODERN PHYSICS. Produção de Radioisótopos: Visão Geral e Aplicações. Disponível em: <https://modern-physics.org/producao-de-radioisotopos-visao-geral-e-aplicacoes/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

MUSWEMA, A. et al. Atmospheric dispersion modeling and radiological safety analysis for a postulated accident scenario. Annals of Nuclear Energy, v. 73, p. 1-10, 2014.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. *Estudos Avançados*, v. 27, n. 77, p. 7-16, 2013.

OLIVEIRA, C.; SANTOS, P.; LIMA, F. Desafios no acondicionamento de rejeitos de baixo e médio níveis de radiação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 12., 2018, São Paulo. Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2018. p. 45-60.

OLIVEIRA, J. A.; SANTOS, E. M. Normas e Práticas de Segurança no Transporte de Materiais Radioativos. 2020.

PIERCE, B. A. Genética: Um Enfoque Conceitual. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2020.

PIROUZMAND, A. et al. Assessment of individual and collective doses around Bushehr Nuclear Power Plant. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 116, p. 1-7, 2015.

RAMACHANDRAN, T. V. A review on natural background radiation. *Iranian Journal of Radiation Research*, v. 9, n. 2, p. 63-76, 2011.

ROCHA, A. C. S.; FERNANDES, H. M. Avaliação de Impacto Radiológico em Depósitos de Rejeitos Radioativos. 2018.

ROJAS, J. P. et al. Modeling and simulation of radionuclide dispersion in atmospheric environments. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 192, p. 1-10, 2018.

ROJAS, N. Y.; GALVIS, B.; BALACHANDRAN, S. Air quality modeling in Latin America: a review. *Atmospheric Environment*, v. 185, p. 1-15, 2018.

ROTHER, H. et al. Integrated risk assessment for radiological dispersal devices. *Health Physics*, v. 110, p. 1-12, 2016.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 1152 p.

SHAMSUDDIN, S. et al. Impact assessment of a hypothetical nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 169, p. 1-9, 2017.

SILVA, R. C.; MENEZES, M. Â. B. C. Gerenciamento de Rejeitos Radioativos no Brasil: Desafios e Perspectivas. 2015.

SMITH, J. The Kyshtym Disaster: A Hidden Nuclear Tragedy. *Environmental History Review*, v. 13, n. 2, p. 1-20, 1989.

SMITH, J.; BROWN, K.; TAYLOR, L. Geological repositories for high-level radioactive waste: technical and social challenges. *Journal of Nuclear Materials Management*, v. 45, n. 3, p. 123-135, 2017.

SMITH, J.; JONES, R. Computational Modeling in Nuclear Safety: Applications and Challenges. *Journal of Nuclear Engineering*, v. 45, n. 3, p. 123-145, 2018.

SMITH, R.; BROWN, T. Lessons from Rocky Flats: Improving Nuclear Safety. *Journal of Environmental Management*, v. 45, n. 3, p. 123-135, 2015.

TAUHATA, L. et al. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. 5. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), 2014.

THOMPSON, L.; GREEN, M. Lessons from Nuclear Accidents: Systemic Failures and Improvements. *Safety Science*, v. 30, n. 2, p. 112-125, 2015.

TUBIANA, M.; DUFRÊNE, J.; LACHAPELLE, A. Introduction à la Radiobiologie et à la Radioprotection. Springer, 2009.

TURNER, D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1994. 192 p.

TURNER, J. E. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. 3rd ed. Wiley-VCH, 2016.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR, 2017 report, Annex B – Medical Exposure to Ionizing Radiation. United Nations, 2017. Disponível em: https://www.unscear.org/docs/publications/2017/UNSCEAR_2017_Annex-B.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). WIPP Recovery Plan: Lessons Learned from the 2014 Fire and Radiological Release. 2015. Disponível em: <https://www.energy.gov>. Acesso em: 31 jan. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Rocky Flats Site Overview. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/rocky-flats>. Acesso em: 31 jan. 2025.

UNSCEAR. Radiation Effects and Sources. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2016.

XAVIER, A. M. et al. Marcos da história da radioatividade e tendências atuais. *Química Nova*, v. 38, n. 1, p. 10-19, 2015.

ZHANG, Y. et al. Risk assessment of radioactive waste repositories: A review of methodologies and tools. *Progress in Nuclear Energy*, v. 74, p. 1-12, 2014.

ZHANG, Y.; WEN, X. Y.; JANG, C. J. Simulating chemistry–aerosol–cloud–radiation–climate feedbacks over the continental U.S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem). *Atmospheric Environment*, v. 96, p. 1-10, 2014.