



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO  
AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**LUIS RICARDO PINOTTI HORTA**

**ESTIMATIVA DE IMPACTOS SOBRE A INFRAESTRUTURA CRÍTICA LOCAL  
DECORRENTES DE UM EVENTO RADIOLÓGICO**



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO  
AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**LUIS RICARDO PINOTTI HORTA**

**ESTIMATIVA DE IMPACTOS SOBRE A INFRAESTRUTURA CRÍTICA LOCAL  
DECORRENTES DE UM EVENTO RADIOLÓGICO**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, vinculada à Linha de Pesquisa Avaliação e Análise de Impacto Ambiental.

Orientador:  
Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade

Coorientadora:  
Prof. Dra. Ana Paula Favareto

658.382 H821e	Horta, Luis Ricardo Pinotti. Estimativa de impactos sobre a infraestrutura crítica local decorrentes de um evento radiológico / Luis Ricardo Pinotti Horta. -Presidente Prudente, 2025. 73 f.: il.  Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste Paulista - Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2025. Bibliografia. Orientador: Dr. Edson Ramos de Andrade  1. Simulação computacional. 2. Bomba suja. 3. Risco radiológico. 4. Emergências urbanas. I. Título.
------------------	--

Catlogação na Fonte: Maria Leticia Silva Vila Real - CRB 8/10699

**LUIS RICARDO PINOTTI HORTA**

**ESTIMATIVA DE IMPACTOS SOBRE A INFRAESTRUTURA CRÍTICA LOCAL  
DECORRENTES DE UM EVENTO RADIOLÓGICO**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, vinculada à Linha de Pesquisa Avaliação e Análise de Impacto Ambiental.

Presidente Prudente, 12 de março de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade  
Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE  
Presidente Prudente – SP

---

Profa. Dra. Máira Rodrigues Uliana  
Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE  
Presidente Prudente – SP

---

Prof. Dr. Tercio Brum  
Universidade de Brasília – UNB  
Brasília – DF

## **DEDICATÓRIA**

Com gratidão, dedico este trabalho a Deus, fonte de força e sabedoria em cada etapa deste percurso. À minha esposa, pelo amor, compreensão e apoio constantes, e aos meus pais, cuja inspiração e incentivo sempre foram fundamentais em minha trajetória. Estendo também meus agradecimentos aos orientadores e amigos que, com suas contribuições, tornaram este projeto possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Nossa Senhora de Fátima, por sua intercessão e proteção constante nos momentos de dificuldade e decisão ao longo desta jornada.

Registro minha sincera gratidão ao Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade, orientador desta pesquisa, cuja competência, dedicação e orientação criteriosa foram determinantes para a construção e o aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço igualmente à Profa. Dra. Maíra Rodrigues Uliana e ao Prof. Dr. Tercio Brum, pelas valiosas contribuições técnicas e observações rigorosas durante a banca de avaliação.

Reconheço ainda a colaboração dos colegas de turma, pelas trocas de experiências, apoio mútuo e incentivo durante o desenvolvimento deste estudo.

Dirijo também um agradecimento especial à minha esposa, pela paciência, compreensão e apoio constante, que foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta etapa com serenidade e firmeza.

*"Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais, para que possamos temer menos."*

*— Marie Curie*

## RESUMO

### **Estimativa de impactos sobre a infraestrutura crítica local decorrentes de um evento radiológico**

Esta dissertação tem como objetivo estimar os impactos iniciais sobre a infraestrutura urbana crítica decorrentes da dispersão atmosférica de material radioativo após um evento do tipo RDD (Dispositivo de Dispersão Radiológica), também conhecido como “bomba suja”. A pesquisa foca nos efeitos das primeiras 100 horas após o evento, considerando diferentes níveis de dose de radiação ionizante e sua influência sobre instalações essenciais, como hospitais, escolas, subestações de energia, rodovias, unidades do Corpo de Bombeiros, delegacias e bases do SAMU.

As simulações foram realizadas utilizando o software HotSpot Health Physics Codes v3.1.2, desenvolvido pelo Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), que aplica um modelo gaussiano para simular a dispersão de contaminantes na atmosfera. Três cenários foram considerados, com doses de 700 mSv, 100 mSv e 50 mSv, representando efeitos determinísticos severos até riscos estocásticos à saúde humana. Foram também aplicadas diferentes classes de estabilidade atmosférica (Pasquill-Gifford), que afetam significativamente o comportamento da pluma radioativa no ambiente urbano.

As plumas geradas foram importadas para o QGIS, onde foram sobrepostas a mapas urbanos previamente georreferenciados. Esta etapa permitiu identificar a sobreposição entre as áreas contaminadas e as infraestruturas críticas, permitindo a análise espacial detalhada dos impactos. Para quantificação, foram utilizados cinco indicadores: o Fator de Risco (RF), o Fator de Impacto Total (FIT), o Índice de Vulnerabilidade (IV), o Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) e a Mediana dos Fatores de Risco (MFR), fornecendo um panorama estatístico e funcional da exposição dos equipamentos urbanos.

Os resultados demonstram que plumas sob atmosfera estável concentram doses elevadas em áreas restritas, enquanto atmosferas instáveis favorecem dispersão ampla com menores concentrações. As escolas e os hospitais destacaram-se como os elementos mais vulneráveis, independentemente do cenário. Verificou-se também que a distribuição espacial da infraestrutura influencia diretamente na severidade dos impactos, sendo essencial sua consideração para estratégias de mitigação e resposta.

Conclui-se que a integração entre modelagem atmosférica e geoprocessamento constitui uma ferramenta eficaz para subsidiar o planejamento urbano e a gestão de emergências radiológicas. A metodologia proposta revela-se adequada para antecipar impactos e orientar decisões em contextos de risco, contribuindo para o fortalecimento da resiliência urbana e a formulação de políticas públicas voltadas à proteção da população e dos serviços essenciais.

**Palavras-chave:** simulação computacional; bomba suja; risco radiológico; emergências urbanas.

## **ABSTRACT**

### **Estimation of impacts on local critical infrastructure resulting from a radiological event**

This dissertation aims to estimate the initial impacts on critical urban infrastructure resulting from the atmospheric dispersion of radioactive material following a Radiological Dispersal Device (RDD) event, commonly referred to as a “dirty bomb.” The study focuses on the first 100 hours after the event, evaluating different radiation dose levels and their influence on essential facilities, including hospitals, schools, power substations, highways, fire stations, police departments, and emergency medical service (SAMU) units.

Simulations were conducted using HotSpot Health Physics Codes v3.1.2, developed by the Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), which applies a Gaussian model to simulate the dispersion of radioactive contaminants in the atmosphere. Three scenarios were analyzed, considering doses of 700 mSv, 100 mSv, and 50 mSv, corresponding to deterministic and stochastic health effects. The simulations also incorporated different Pasquill-Gifford atmospheric stability classes, which significantly influence the behavior of the radioactive plume in urban environments.

The resulting plumes were imported into QGIS, where they were spatially overlaid onto georeferenced urban infrastructure maps. This integration allowed the identification of overlap between contaminated zones and critical infrastructure, enabling a detailed spatial analysis. Five indicators were employed to quantify exposure and vulnerability: the Risk Factor (RF), Total Impact Factor (FIT), Vulnerability Index (VI), Standard Deviation of Risk Factors (SDRF), and Median of Risk Factors (MRF), providing both statistical and operational insight into the severity of the impacts.

Results indicate that stable atmospheric conditions tend to concentrate radioactive doses in narrower areas, while unstable conditions promote broader dispersion with lower concentrations. Schools and hospitals consistently emerged as the most vulnerable structures across all scenarios. Furthermore, the spatial distribution of infrastructure plays a decisive role in the extent of radiological impacts, highlighting the importance of localized emergency planning.

It is concluded that the integration of atmospheric modeling with geospatial analysis is an effective tool to support urban planning and radiological emergency management.

The proposed methodology proves to be suitable for anticipating risks and guiding decision-making, thus contributing to urban resilience and the development of public policies aimed at protecting populations and essential services.

**Keywords:** computational simulation; dirty bomb; radiological risk; urban emergencies.

## LISTA DE SIGLAS

CNEN	— Comissão Nacional de Energia Nuclear
DOE	— Department of Energy (EUA)
FAI	— Centro Universitário de Adamantina
IAEA	— International Atomic Energy Agency (Agência Internacional de Energia Atômica)
IBGE	— Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRP	— International Commission on Radiological Protection (Comissão Internacional de Proteção Radiológica)
ICRU	— International Commission on Radiation Units and Measurements (Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação)
INCA	— Instituto Nacional do Câncer
INMET	— Instituto Nacional de Meteorologia
LLNL	— Lawrence Livermore National Laboratory (Laboratório Nacional Lawrence Livermore, EUA)
NRC	— Nuclear Regulatory Commission (Comissão Reguladora Nuclear, EUA)
QGIS	— Quantum Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica de Código Aberto)
SAMU	— Serviço de Atendimento Móvel de Urgência
SP	— Estado de São Paulo
UNESCO	— Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNOESTE	— Universidade do Oeste Paulista
WHO	— World Health Organization (Organização Mundial da Saúde - OMS)

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1—</b>	Esquema simplificado das ações diretas e indiretas de radiações no modelo clássico radiobiológico de interação com o DNA.....	30
<b>Figura 2—</b>	Tela inicial com os modelos disponíveis .....	32
<b>Figura 3—</b>	Tela de entrada de dados do termo-fonte .....	33
<b>Figura 4—</b>	Tela de seleção de dados meteorológicos .....	33
<b>Figura 5—</b>	Tela de seleção de localização de receptores .....	34
<b>Figura 6—</b>	Tela para se customizar os relatórios e mapas de saída .....	34
<b>Figura 7—</b>	Tela de solicitação de dados de saída .....	35
<b>Figura 8—</b>	Esquema metodológico geral.....	41
<b>Figura 9—</b>	Impacto Geral das Plumagens – Total de Infraestrutura atingida .....	47
<b>Figura 10—</b>	Impacto da Pluma 700 mSv .....	49
<b>Figura 11—</b>	Impacto da Pluma 50 mSv .....	50
<b>Figura 13—</b>	Fator de Risco Pluma 700 mSv.....	53
<b>Figura 14—</b>	Fator de Risco Pluma 100 mSv.....	54
<b>Figura 15—</b>	Fator de Risco Pluma 50 mSv.....	55
<b>Figura 16—</b>	Fator de Impacto Total (FIT) .....	56
<b>Figura 17—</b>	Índice de Vulnerabilidade (IV) .....	58
<b>Figura 18—</b>	Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR).....	60
<b>Figura 19—</b>	Mediana dos Fatores de Risco (MFR).....	62
<b>Figura 20—</b>	Pluma de 700 mSv na classe A .....	63
<b>Figura 21—</b>	Pluma de 700 mSv na classe B .....	64
<b>Figura 22—</b>	Pluma de 700 mSv na classe C .....	65
<b>Figura 23—</b>	Pluma de 700 mSv na classe D .....	65
<b>Figura 24—</b>	Pluma de 700 mSv na classe E .....	66
<b>Figura 25—</b>	Pluma de 700 mSv na classe F.....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1—</b>	Exemplos de fatores de ponderação da radiação (WR).....	24
<b>Tabela 2—</b>	Alguns fatores de peso de órgãos e tecidos (WT) específicos para o cálculo de dose efetiva de acordo com a ICRP 103.....	25
<b>Tabela 3—</b>	Condições meteorológicas para classificação da estabilidade atmosférica de categorias de A a F utilizadas no HotSpot.....	36
<b>Tabela 4—</b>	Pesos das Infraestruturas .....	43
<b>Tabela 5—</b>	Número de Escolas Impactadas pela Pluma de 700 mSv em Diferentes Classes Pasquill-Gifford .....	62

## SUMÁRIO

	<b>PRÓLOGO .....</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Radiação e suas Interações com a Matéria.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Ameaças Radiológicas e Nucleares: Riscos e Impactos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Infraestruturas Críticas Urbanas e Resiliência .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Grandezas Dosimétricas de Interesse .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Considerações Básicas sobre Efeitos Biológicos da Radiação.....</b>	<b>28</b>
<b>2.6</b>	<b>Modelagem Computacional e Ferramentas de Análise .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Delimitação de Escopo .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Simulação com HotSpot e Modelo Gaussiano.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3</b>	<b>Zonas de Efeito Determinístico .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4</b>	<b>Avaliação do Impacto e Vulnerabilidade das Infraestruturas Críticas...41</b>	
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise do Impacto das Plumas Radiológicas nas Infraestruturas Críticas .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Impacto Geral das Plumas Radiológicas .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Impacto por Tipo de Infraestrutura.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2</b>	<b>Discussão Comparativa dos Resultados .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>Resultados dos Cálculos dos Indicadores de Risco e Vulnerabilidade 52</b>	
<b>4.3.1</b>	<b>Fator de Risco (RF) .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Fator de Impacto Total (FIT).....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Índice de Vulnerabilidade (IV).....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Mediana dos Fatores de Risco (MFR).....</b>	<b>60</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise da Pluma de 700 mSv nas Classes de Pasquill-Gifford.....</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1</b>	<b>Contribuições e limitações .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## PRÓLOGO

Ao longo da minha trajetória acadêmica e profissional, formei-me em Engenharia Civil pela Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE). Posteriormente, realizei uma pós-graduação em Engenharia de Avaliações e Perícias pelo Instituto Keynes e me especializei em Engenharia de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário de Adamantina (FAI). Durante essa especialização, tive a oportunidade de me envolver em projetos de plano de emergência relacionados a barragens em Minas Gerais, algumas das quais haviam passado por rompimentos recentes, gerando situações críticas de risco e necessidade de respostas rápidas.

Esse contexto de emergência e as consequências desses eventos me sensibilizaram para a importância da preparação e resposta a desastres, motivando-me a explorar temas que envolvem situações de risco extremo e a busca por soluções mais eficazes. Foi nesse cenário que nasceu meu interesse pela pesquisa que desenvolvo atualmente: Estimativa de impactos sobre a infraestrutura crítica local decorrentes de um evento radiológico. A escolha desse tema foi profundamente influenciada por minha formação e pelas experiências vividas no campo da segurança do trabalho, especialmente em contextos de emergência. A possibilidade de estudar os impactos das condições atmosféricas em situações de contaminação radiológica me proporcionou um novo desafio, ao mesmo tempo que ampliou minha visão sobre a importância da preparação para situações críticas em ambientes urbanos.

Trabalhar com esse tema desafiador tem sido uma experiência enriquecedora, que não apenas exigiu uma ampliação dos meus conhecimentos técnicos, mas também me fez refletir sobre o papel do engenheiro na proteção e segurança da sociedade. Tenho convicção de que os aprendizados adquiridos ao longo desta jornada acadêmica, somados ao meu acompanhamento e orientação do Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade, resultaram em um trabalho que contribui para a evolução do conhecimento e para a melhoria das práticas em emergências radiológicas.

## 1 INTRODUÇÃO

As infraestruturas urbanas desempenham um papel fundamental na sustentação das atividades essenciais da sociedade, como transporte, energia, abastecimento de água, saúde e comunicação. No entanto, essas estruturas estão sujeitas a uma ampla gama de ameaças, incluindo desastres naturais, falhas operacionais e, mais preocupantemente, eventos radiológicos (Guidotti *et al.*, 2016; IAEA, 2020). A ocorrência de um evento radiológico em um ambiente urbano pode acarretar graves consequências para a saúde pública, o meio ambiente e a segurança nacional, tornando imperativo o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e resposta (ICRP, 2007; Saenko *et al.*, 2011).

Historicamente, diversos incidentes envolvendo materiais radioativos demonstraram o potencial devastador da contaminação radiológica. O acidente de Chernobyl em 1986, na Ucrânia, é um dos mais emblemáticos, resultando na liberação de enormes quantidades de radionuclídeos na atmosfera, contaminação prolongada do solo e impactos severos na saúde de milhões de pessoas (IAEA, 2020). Além dos danos ambientais de longo prazo, houve um aumento significativo nos casos de câncer de tireoide e outras doenças radio induzidas entre as populações expostas (Saenko *et al.*, 2011).

No Brasil, o acidente radiológico de Goiânia em 1987 revelou a vulnerabilidade das infraestruturas locais no manuseio inadequado de materiais radioativos. A exposição acidental ao césio-137, proveniente de um equipamento de radioterapia descartado de maneira irregular, resultou em contaminação generalizada, vários óbitos e centenas de casos de exposição significativa à radiação, evidenciando a necessidade de regulamentos mais rigorosos e protocolos eficazes para o gerenciamento de rejeitos radioativos (IAEA, 1988; Saenko *et al.*, 2011).

Mais recentemente, o desastre de Fukushima em 2011 no Japão ressaltou a interação crítica entre desastres naturais e acidentes nucleares. Um terremoto seguido de tsunami levou ao colapso de reatores na usina nuclear de Fukushima Daiichi, resultando em vazamentos massivos de material radioativo (Kim; Kim; Kim, 2013; IAEA, 2020). Os impactos incluíram deslocamento de populações, contaminação de áreas agrícolas e marinhas, além de severas restrições à segurança alimentar e ao abastecimento de energia.

A vulnerabilidade das infraestruturas urbanas diante da detonação de dispositivos radiológicos, como Dispositivos de Dispersão Radiológica (RDD) e dispositivos nucleares táticos, representa um risco significativo para a saúde pública e a continuidade dos serviços essenciais. O problema central desta pesquisa reside na incapacidade dessas infraestruturas críticas de suportar os impactos de eventos radiológicos, comprometendo setores essenciais como saúde, transporte, comunicação e segurança pública.

A hipótese deste estudo é que as condições atmosféricas influenciam significativamente a dispersão de materiais radioativos em áreas urbanas, afetando de forma diferenciada infraestruturas críticas, como hospitais, escolas e rodovias. A dispersão varia conforme a classe de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford, impactando a área e a concentração da contaminação. Isso destaca a necessidade de estratégias específicas de mitigação para reduzir os riscos em diferentes cenários urbanos.

Este trabalho faz parte do programa Prointer-resíduos, que visa avaliar a contaminação ambiental por elementos radioativos e propor soluções para mitigar seus impactos. A pesquisa contribui para esse objetivo ao demonstrar como as infraestruturas urbanas podem minimizar a dispersão radiológica e os efeitos sobre populações expostas.

Alinhado à Agenda 2030 da ONU, este estudo contribui para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), entre eles, a avaliação dos impactos da radiação sobre populações expostas e a proposição de medidas mitigadoras (ODS 3 - Saúde e Bem-Estar). Além disso, discute a segurança dos materiais radioativos utilizados para geração de energia e a necessidade de protocolos rigorosos para seu armazenamento e transporte (ODS 7 - Energia Limpa e Acessível). Por fim, propõe diretrizes para o fortalecimento da resiliência de infraestruturas críticas diante de eventos radiológicos (ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura).

Neste estudo considera-se o acionamento de um dispositivo nuclear tático hipotético com potência equivalente (yield) de 10 kT (1 quiloton = 1000 toneladas de TNT) sobre zona urbana habitada (não identificada). O objetivo principal da proposta é gerar dados iniciais para prover assessoria científica à tomada de decisão em tempo curto ( $\approx$  100 horas) e de maneira conservadora. Esta assessoria se refere às zonas contaminadas com altas doses de radiação e com expectativa de registro de efeitos determinísticos na população impactada. Os resultados das simulações buscam

contribuir para o estabelecimento de regras de priorização do atendimento à população e mapeamento de zonas de alto risco. Tais regras podem ser definidas com base nas consequências imediatas esperadas em decorrência do desastre simulado dentro de um período não maior que 4 dias ( $\approx 100\text{h}$ ) a contar do momento do evento ou de sua detecção. Por meio de simulação computacional analítica conservadora (pessimista), foram estudadas as possíveis variações de dispersão conforme Pasquill-Gifford e a proteção oferecida contra radiações por estruturas urbanas para a população em geral. O reconhecimento da função protetiva de estruturas urbanas é dado por seus fatores de redução de dose de radiação (FR) (Furuta; Takahashi, 2015), que podem gerar dados de valor para a criação de protocolos de priorização de zonas de atendimento preferenciais. Nesta perspectiva, espera-se impacto positivo sobre a otimização da aplicação dos recursos disponíveis. O estudo foi realizado em uma cidade com mais de 150 mil habitantes. Para isso, utiliza-se modelagem computacional analítica para delinear um cenário hipotético de detonação de dispositivos táticos nucleares ou dispositivos de dispersão radiológica (RDD), também conhecidos como "bombas sujas". Nesse contexto, o impacto das condições atmosféricas locais, caracterizadas pelas classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (PG), desempenha um papel essencial na determinação da dispersão de contaminantes radioativos (Venkatram, 1996; Homann, 2019).

A efetividade dos dispositivos radiológicos, como o RDD, e dos dispositivos nucleares táticos, depende em grande parte das condições do ambiente urbano. Edificações, vias de transporte e vegetação afetam diretamente a dispersão e deposição de partículas radioativas, influenciando os danos às infraestruturas críticas e à saúde humana (U.S. NRC, 2010; LEE *et al.*, 2010). No contexto brasileiro, o acidente radiológico de Goiânia destacou a necessidade de protocolos rigorosos para a gestão de emergências e mitigação da contaminação (IAEA, 1988; Saenko *et al.*, 2011). O planejamento urbano e a resiliência das infraestruturas são essenciais para minimizar impactos de eventos radiológicos e garantir a continuidade dos serviços essenciais (Guidotti *et al.*, 2016; Andrade, 2022a).

Os modelos computacionais analíticos, como o HotSpot Health Physics, permitem simular cenários de dispersão de materiais radioativos. Essas simulações são essenciais por oferecerem segurança, economia e versatilidade na previsão de impactos radiológicos, permitindo explorar parâmetros como velocidade do vento, estabilidade atmosférica e a localização de infraestruturas críticas (Silva *et al.*, 2015).

Além disso, auxiliam na estimativa de doses de radiação, na previsão de riscos biológicos e na análise dos impactos sobre a infraestrutura urbana (Alves *et al.*, 2019).

Este estudo adota uma abordagem quantitativa baseada em modelagem computacional, combinando análise teórica com simulações de cenários hipotéticos envolvendo dispositivos de dispersão radiológica (RDD) e condições atmosféricas específicas. Os resultados fornecem subsídios para a tomada de decisões, contribuindo para a formulação de estratégias de mitigação e planejamento urbano em desastres radiológicos (Guidotti *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2024).

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa, na qual são expostos o contexto do problema, a delimitação do tema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa da relevância do estudo, a hipótese formulada e a metodologia adotada, estabelecendo as bases conceituais e operacionais que fundamentam a investigação. No Capítulo 2, são abordados os fundamentos teóricos que sustentam a pesquisa, incluindo conceitos sobre radiação ionizante, modelagem da dispersão atmosférica e os efeitos de eventos radiológicos na saúde pública e no meio urbano. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, detalhando os modelos computacionais utilizados, as variáveis analisadas e os critérios para avaliação dos impactos radiológicos em diferentes cenários atmosféricos. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados das simulações, analisando a dispersão da pluma radioativa, os efeitos sobre infraestruturas críticas e os indicadores de risco desenvolvidos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, ressaltando suas contribuições para o planejamento de resposta a emergências radiológicas, as limitações encontradas e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que embasam o presente trabalho, por meio de uma revisão bibliográfica que aborda os aspectos principais da radiação ionizante, seu impacto em infraestruturas urbanas críticas e os fenômenos associados à sua dispersão atmosférica. O objetivo é fornecer uma base sólida para compreender os efeitos radiológicos em cenários urbanos e o papel de ferramentas de modelagem e simulação no estudo desses impactos.

### 2.1 Radiação e suas Interações com a Matéria

A radiação ionizante é caracterizada pela capacidade de ionizar átomos ou moléculas ao interagir com a matéria. Esse processo ocorre por meio de três interações principais: efeito fotoelétrico, dispersão Compton e produção de pares, sendo cada uma delas dependente da energia da radiação e do meio onde ocorre (Hall; Giaccia, 2019).

O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton transfere toda sua energia a um elétron atômico, promovendo sua ejeção. Esse fenômeno é predominante em materiais de alto número atômico, como chumbo, e em baixas energias de fótons. Já a dispersão Compton é o principal mecanismo de interação em tecidos biológicos, pois envolve a transferência parcial de energia do fóton para um elétron livre, resultando na emissão de um fóton secundário com energia reduzida (ICRP, 2007).

Por outro lado, a produção de pares ocorre quando um fóton de alta energia (superior a 1,02 MeV) interage com o núcleo atômico e se converte em um par elétron-pósitron. Esse fenômeno é relevante para materiais de alta densidade e influencia diretamente a blindagem contra radiação de equipamentos e infraestruturas (IAEA, 2020).

Essas interações são fundamentais para a compreensão dos danos biológicos e estruturais causados pela radiação ionizante, pois determinam a penetração e o impacto da radiação em diferentes materiais. Estudos indicam que materiais construtivos, como concreto e aço, apresentam coeficientes de atenuação distintos para diferentes tipos de radiação (Andrade *et al.*, 2022b).

## 2.2 Ameaças Radiológicas e Nucleares: Riscos e Impactos

A radiação ionizante representa um risco significativo em diversos cenários, abrangendo desde exposições acidentais em ambientes médicos e industriais até situações envolvendo dispositivos de dispersão intencional. A ameaça radiológica caracteriza-se pela possibilidade de liberação de material radioativo, com potenciais consequências para a saúde pública, o meio ambiente e a segurança nacional. A análise desses riscos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e resposta (Florig; Fischhoff, 2007; Andrade *et al.*, 2022b).

Entre os dispositivos de maior relevância para esse contexto estão os Dispositivos de Dispersão Radiológica (RDD), também conhecidos como “bombas sujas”, que combinam explosivos convencionais com materiais radioativos para contaminar áreas urbanas. Esses eventos, ainda que de menor potência física, provocam impactos desproporcionais pela contaminação ambiental e pelo pânico social. Já os dispositivos nucleares táticos, com menor yield que armas estratégicas, têm poder destrutivo considerável, sobretudo em ambientes urbanos densamente povoados (U.S. NRC, 2010; Karam, 2005; Kristensen; Korda, 2019).

A gestão do risco radiológico requer identificação de áreas vulneráveis, modelagem da dispersão atmosférica e estimativas de dose absorvida. Ferramentas computacionais, como modelos gaussianos, permitem prever zonas de evacuação e estimar os efeitos de curto e longo prazo. Dentre os efeitos à saúde, destaca-se a Síndrome Aguda da Radiação (SAR), cujos sintomas (náuseas, vômitos, linfopenia e hemorragias) surgem a partir de exposições acima de 700 mSv, podendo evoluir para falência orgânica e óbito (Homann, 2014; ICRP, 2007).

Eventos históricos reforçam a gravidade do tema. Em Chernobyl (1986), a combinação de falha humana, projeto inadequado e ausência de contenção levou à liberação de cerca de 5,2 EBq de radionuclídeos. As consequências incluíram a evacuação de mais de 300 mil pessoas e um aumento expressivo na incidência de câncer de tireoide (Saenko *et al.*, 2011). Em Fukushima (2011), o colapso de sistemas de resfriamento, após terremoto e tsunami, resultou na liberação de 15.000 TBq de céσιο-137, com impactos sobre o abastecimento alimentar, deslocamento populacional e contaminação de solo e água (Kim; Kim; Kim, 2013). No Brasil, o caso de Goiânia (1987) evidenciou falhas na destinação de rejeitos radioativos e no controle institucional: a violação de uma cápsula de céσιο-137 contaminou 249 pessoas e

resultou em quatro óbitos confirmados, exigindo descontaminação extensa e alterações permanentes no marco regulatório (IAEA, 1988; Greenberg, 2019).

A compreensão técnica desses eventos permite extrair lições relevantes para a formulação de políticas públicas e protocolos de emergência. A integração entre modelos de dispersão, dados meteorológicos e mapas urbanos é essencial para antecipar impactos, priorizar recursos e minimizar os danos sobre a população e a infraestrutura crítica urbana

### **2.3 Infraestruturas Críticas Urbanas e Resiliência**

Infraestruturas críticas são sistemas essenciais para a funcionalidade e segurança das cidades. Sua resiliência determina a capacidade de resposta a desastres naturais, ataques terroristas ou eventos radiológicos (CISA, 2019).

A interdependência entre setores como transporte, energia e saúde influencia diretamente a gestão de crises. A interrupção de qualquer um desses sistemas pode amplificar os impactos de um evento radiológico, afetando a capacidade de resposta emergencial (Rinaldi *et al.*, 2001).

No contexto de um evento de dispersão radiológica, o tempo de resposta dos serviços de emergência é fundamental. Modelos matemáticos indicam que o bloqueio de vias principais pode aumentar em até 35% o tempo de deslocamento de ambulâncias e equipes de resgate, comprometendo a eficácia da mitigação dos impactos (Kamboj *et al.*, 2009).

Hospitais são essenciais para atendimento emergencial, especialmente em eventos com múltiplas vítimas expostas à radiação (WHO, 2011). Subestações de energia garantem o fornecimento de eletricidade para hospitais e serviços de emergência. Falhas nesses sistemas podem comprometer as operações de descontaminação e suporte hospitalar (Panteli; Mancarella, 2015). Rodovias e sistemas de transporte desempenham um papel crucial na evacuação de populações e no deslocamento de recursos (Chen *et al.*, 2001). As forças de segurança, incluindo polícia e bombeiros, são responsáveis pelo controle da ordem pública e operações de resgate (Alexander, 2002; de Bruijne; Van Eeten, 2007). O Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) é crucial para triagem e suporte pré-hospitalar (Brasil, 2020). Escolas e abrigos podem ser utilizados como centros de evacuação temporários em situações de crise (UNESCO, 2017).

A resiliência urbana dessas infraestruturas pode reduzir significativamente os danos humanos e estruturais em um evento radiológico. Estudos indicam que estratégias de descentralização dos serviços críticos e planos de contingência robustos elevam a capacidade de recuperação pós-crise (Guidotti *et al.*, 2016).

## 2.4 Grandezas Dosimétricas de Interesse

A quantificação da interação da radiação ionizante com a matéria é um aspecto essencial na radioproteção e na avaliação de riscos associados à exposição radioativa. As grandezas dosimétricas são utilizadas para descrever a transferência de energia da radiação para os tecidos biológicos e outros meios materiais, permitindo estimativas sobre os efeitos potenciais da radiação em diferentes cenários (Attix, 2007; Knoll, 2000). O estabelecimento de padrões internacionais para essas grandezas visa garantir medições consistentes e comparáveis, possibilitando a implementação de normas regulatórias adequadas. Para isso, organizações como a *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) e a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) desempenham um papel fundamental na definição e atualização dessas grandezas e suas respectivas unidades (ICRP, 2007).

Dado que diferentes tipos de radiação interagem com a matéria de formas distintas, as grandezas dosimétricas foram desenvolvidas para considerar essas variações e fornecer uma avaliação mais precisa do impacto radiológico. Essas grandezas incluem a dose absorvida (D), a dose equivalente (HT), a dose efetiva (E), a dose coletiva efetiva e a dose equivalente efetiva total (TEDE). A seguir, cada uma dessas grandezas será discutida em detalhes.

A dose absorvida (D) é uma das grandezas fundamentais na dosimetria da radiação, pois descreve a quantidade de energia depositada por uma radiação ionizante em uma unidade de massa do material exposto. Essa grandeza é essencial para a avaliação dos efeitos físicos da radiação, sendo amplamente utilizada em contextos de proteção radiológica, radioterapia e segurança nuclear (Attix, 2007; Knoll, 2000).

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a dose absorvida é expressa em Gray (Gy), sendo 1 Gy equivalente a 1 Joule por quilograma (J/kg). Essa unidade

representa a transferência direta de energia da radiação para a matéria, sem considerar impacto biológico para os diferentes tipos de radiação (ICRP, 2007).

A dose absorvida é particularmente importante para a caracterização dos efeitos determinísticos da radiação, como a destruição celular e os danos estruturais em tecidos vivos e materiais expostos. No entanto, para avaliar adequadamente os riscos biológicos, é necessário considerar fatores adicionais, como o tipo de radiação incidente e a sensibilidade dos tecidos irradiados. Esses fatores levaram ao desenvolvimento de outras grandezas dosimétricas, como a dose equivalente e a dose efetiva, abordadas nas próximas seções (Heilbron, 2017; ICRP, 2007). O conceito é introduzido matematicamente pela equação 01.

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \qquad 01 D_T = \frac{dE}{dm}$$

onde  $\bar{d\varepsilon}$  é a energia média depositada no elemento de massa  $dm$ .

A dose equivalente (HT) é uma grandeza essencial na dosimetria da radiação, pois ajusta a dose absorvida (D) considerando o impacto biológico específico de cada tipo de radiação. Enquanto a dose absorvida apenas quantifica a energia depositada por unidade de massa, a dose equivalente incorpora um fator de ponderação da radiação ( $W_R$ ), que reflete sua capacidade de causar danos biológicos (ICRP, 2007).

Radiações como fótons e elétrons possuem um poder de ionização relativamente baixo, enquanto partículas alfa e nêutrons apresentam um alto potencial de deposição de energia nos tecidos biológicos, aumentando significativamente os danos celulares para a mesma dose absorvida (Heilbron, 2017). Para corrigir essas diferenças, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) definiu valores específicos para  $W_R$  que são aplicados no cálculo da dose equivalente (ICRP, 2007). A dose equivalente é expressa em Sievert (Sv) e calculada pela equação 02

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot W_R \qquad 02$$

onde  $D_{T,R}$  é a dose depositada pela radiação de tipo R, em média, sobre um tecido ou órgão T e  $W_R$  é o fator de ponderação para a radiação do tipo R.

Os valores de ponderação da radiação foram definidos com base em estudos experimentais sobre os efeitos biológicos e são revisados periodicamente pela ICRP. A Tabela 1 apresenta os fatores estabelecidos pela ICRP 103 (ICRP, 2007).

**Tabela 1—** Exemplos de fatores de ponderação da radiação ( $W_R$ )

<b>Tipo e faixa de energia<sup>a</sup></b>	<b><math>W_R</math><sup>b</sup></b>
<b>Fótons (todas as energias), elétrons e múons (todas as energias)</b>	1
<b>Nêutrons &lt; 10 keV</b>	5
<b>Nêutrons de 10 keV a 100 keV</b>	10
<b>Nêutrons de &gt; 100 keV a 2 MeV</b>	20
<b>Nêutrons de &gt; 2 MeV a 20 MeV</b>	10
<b>Nêutrons &gt; 20 MeV</b>	5
<b>Partículas <math>\alpha</math>, fragmentos de fissão, núcleos pesados</b>	20

Legenda: a. Valores para outras radiações podem ser obtidos no Anexo A da ICRP-60.

b. Todos os valores se relacionam à radiação incidente no organismo ou fontes internas.

Fonte: ICRP (2007).

Os fatores de ponderação demonstram que algumas radiações, como partículas alfa e nêutrons, apresentam um impacto biológico significativamente maior em comparação com fótons e elétrons. Por exemplo, uma partícula alfa tem um fator de ponderação 20 vezes maior que um fóton, indicando que, para a mesma dose absorvida, seu efeito biológico pode ser 20 vezes mais intenso (ICRP, 2007).

A implementação do conceito de dose equivalente permitiu a criação de normas mais precisas para a avaliação dos riscos radiológicos. Essa grandeza é utilizada para definir limites de exposição ocupacional e pública, garantindo um controle adequado dos riscos associados à radiação ionizante (Attix, 2007; ICRP, 2007).

A dose efetiva (**E**) é uma grandeza dosimétrica que aprimora a avaliação do impacto da radiação ionizante sobre o organismo humano ao considerar tanto a energia absorvida quanto a sensibilidade dos diferentes tecidos e órgãos expostos. Essa grandeza foi introduzida pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) como uma ferramenta essencial para a proteção radiológica, permitindo uma estimativa mais realista do risco associado a diferentes exposições (ICRP, 2007).

Diferentes tecidos e órgãos apresentam graus variados de susceptibilidade aos efeitos da radiação. Órgãos como pulmão, estômago, medula óssea e mamas são mais vulneráveis e, portanto, possuem um fator de ponderação maior em comparação a tecidos menos sensíveis, como pele e ossos (ICRP, 2007; Heilbron, 2017). Esse

fator de ponderação, definido experimentalmente, leva em consideração a probabilidade de desenvolvimento de efeitos estocásticos, como câncer e mutações genéticas, associadas à exposição prolongada à radiação ionizante (Attix, 2007). A dose efetiva equivalente é expressa em Sievert (Sv) e pode ser calculada por meio da equação 03:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad 03$$

onde  $H_T$  é a dose efetiva equivalente no tecido T e  $w_T$  é o fator de peso do tecido.

Os fatores de ponderação dos tecidos refletem o risco relativo de indução de câncer ou efeitos hereditários devido à exposição à radiação. A Tabela 2 apresenta os valores estabelecidos na publicação ICRP 103 (ICRP, 2007).

**Tabela 2—** Alguns fatores de peso de órgãos e tecidos ( $W_T$ ) específicos para o cálculo de dose efetiva de acordo com a ICRP 103

<b>Órgão ou Tecido</b>	<b><math>W_T</math></b>
<b>Pele</b>	0,01
<b>Gônadas</b>	0,08
<b>Mamas</b>	0,12
<b>Medula óssea</b>	0,12
<b>Pulmão</b>	0,12
<b>Estômago</b>	0,12

Fonte: ICRP (2007)

A dose efetiva é amplamente utilizada para estimar riscos ocupacionais em trabalhadores expostos à radiação e para definir limites de dose para a população em geral. De acordo com a ICRP 103 (2007), os limites anuais de exposição recomendados são:

- (a) Trabalhadores ocupacionalmente expostos: 20 mSv/ano em média, considerando um período de 5 anos, com um limite máximo de 50 mSv em um único ano.
- (b) População geral: 1 mSv/ano, com exceção de exposições médicas e ocupacionais específicas.

A introdução da dose efetiva como métrica na radioproteção possibilitou um avanço significativo na avaliação de risco global à saúde. Essa abordagem permite não apenas o monitoramento da exposição em diferentes cenários, mas também a implementação de políticas de proteção radiológica baseadas em evidências científicas (ICRP, 2007; Homann, 2019).

Ao considerar tanto a energia depositada quanto a sensibilidade dos tecidos, a dose efetiva representa uma ferramenta indispensável para planejamento de medidas de mitigação, resposta a emergências e regulamentação da exposição à radiação em diversas áreas, incluindo aplicações médicas, industriais e ambientais (Heilbron, 2017; Attix, 2007).

A dose coletiva efetiva é uma grandeza utilizada para avaliar o impacto da radiação ionizante sobre populações expostas, permitindo estimar os efeitos cumulativos da exposição radiológica em comunidades, trabalhadores que são expostos e grupos populacionais submetidos a procedimentos médicos ou ambientais (ICRP, 2007; CNEN, 2011). A principal aplicação está na análise de risco radiológico, regulamentação da exposição ocupacional e estudos epidemiológicos.

Essa métrica é particularmente relevante na avaliação de acidentes nucleares, como os eventos de Chernobyl (1986) e Fukushima (2011), onde a dose coletiva efetiva foi essencial para estimar o nível de exposição da população e embasar decisões sobre evacuação e descontaminação (IAEA, 2020). No monitoramento ocupacional, a dose coletiva permite definir limites de exposição para trabalhadores da indústria nuclear, radiologia e medicina nuclear, auxiliando no desenvolvimento de diretrizes de segurança para diferentes categorias profissionais (CNEN, 2011).

No contexto da exposição médica, essa grandeza possibilita avaliar os impactos cumulativos de exames de radiodiagnóstico e radioterapia, contribuindo para a otimização das doses utilizadas e para a adoção de práticas que minimizem exposições desnecessárias (ICRP, 2007). A dose coletiva efetiva também é aplicada no estudo da dispersão de radionuclídeos em ambientes naturais e industriais, incluindo a exposição ao radônio em espaços fechados e as emissões de materiais radioativos resultantes de processos industriais (Brenner *et al.*, 2003).

Embora a dose coletiva forneça uma visão global da exposição populacional, sua interpretação requer cautela, pois ela não diferencia entre uma grande população exposta a doses baixas e um pequeno grupo submetido a doses elevadas. Portanto, sua utilização deve ser complementada com outras métricas que permitam avaliar

com maior precisão os impactos individuais da exposição à radiação ionizante (ICRP, 2007).

A dose equivalente efetiva total (TEDE - Total Effective Dose Equivalent) é uma grandeza utilizada para quantificar a exposição total de um indivíduo à radiação ionizante, considerando tanto as exposições externas, provenientes de fontes radioativas situadas fora do organismo, quanto as exposições internas, decorrentes da inalação, ingestão ou absorção de radionuclídeos (Fairuz; Sahadath, 2020). Sua aplicação é fundamental para a avaliação de acidentes radiológicos, monitoramento de trabalhadores expostos e planejamento de ações de mitigação, pois permite estimar a dose total acumulada em diferentes cenários de exposição. É importante destacar que a TEDE não representa um conceito oficialmente utilizado no Brasil. Entretanto, é possível utilizá-lo em equivalência ao conceito de dose (efetiva) equivalente, apresentado pela equação 03.

A TEDE é amplamente utilizada na resposta a liberações acidentais de material radioativo, sendo essencial para a avaliação das doses recebidas por indivíduos em áreas contaminadas. Esse parâmetro auxilia na tomada de decisões sobre a necessidade de evacuação, a adoção de medidas de descontaminação e a imposição de restrições de acesso a determinadas regiões (IAEA, 2020). No âmbito da proteção ocupacional, a TEDE desempenha um papel central na segurança de trabalhadores da indústria nuclear e laboratórios radiológicos, garantindo que os limites anuais de exposição sejam respeitados e que medidas de controle sejam implementadas para minimizar riscos associados à radiação ionizante (ICRP, 2007).

No contexto da exposição médica e terapêutica, essa métrica é utilizada para avaliar doses associadas a procedimentos que envolvem radionuclídeos, como a iodoterapia e o uso de radiofármacos. Assim, a TEDE permite a determinação da dose máxima tolerável para pacientes e profissionais da saúde, assegurando a eficácia dos tratamentos ao mesmo tempo em que minimiza os riscos (CNEN, 2011).

Além da aplicação em exposições médicas e ocupacionais, a TEDE é uma ferramenta para a avaliação de resultados decorrentes da exposição à radiação. Esse parâmetro é empregado para estudar a ingestão de radionuclídeos através da água, dos alimentos e do ar, possibilitando a formulação de regulamentações sobre qualidade ambiental e segurança alimentar (Brenneer *et al.*, 2003).

A interpretação da TEDE deve considerar o tipo de radiação envolvida, a duração da exposição e a suscetibilidade individual, pois diferentes tipos de radiação

apresentam efeitos biológicos distintos. Radiações altamente ionizantes, como partículas alfa, possuem um impacto muito mais significativo nos tecidos biológicos em comparação com fótons e partículas beta, exigindo critérios específicos para sua avaliação (Fairuz; Sahadath, 2020).

A dose equivalente efetiva total continua sendo um dos principais parâmetros na proteção radiológica e gestão de riscos, permitindo avaliar a exposição total de um indivíduo e orientar medidas de proteção adequadas, seja no contexto ocupacional, ambiental ou médico (ICRP, 2007; IAEA, 2020).

## **2.5 Considerações Básicas sobre Efeitos Biológicos da Radiação**

A exposição à radiação ionizante pode causar uma série de efeitos biológicos nos tecidos vivos, cuja intensidade e severidade dependem de fatores como o tipo e a energia da radiação, a dose recebida, o tempo de exposição e a sensibilidade do organismo. Esses efeitos são geralmente classificados em determinísticos e estocásticos, sendo amplamente estudados na literatura científica para entender as implicações da radiação na saúde humana (Homann, 2014).

Estudos recentes indicam que exposições significativas à radiação em ambientes urbanos podem reduzir a expectativa de vida da população afetada, com impactos que variam conforme a dose recebida e a resiliência biológica dos indivíduos expostos (Neves *et al.*, 2024). Tais achados reforçam a necessidade de estratégias efetivas para resposta a emergências radiológicas, visando minimizar tanto os efeitos agudos quanto os impactos de longo prazo na saúde pública.

Os efeitos determinísticos ocorrem quando a dose de radiação ultrapassa um determinado limiar, levando a danos celulares irreversíveis. Esse tipo de efeito está associado a manifestações como catarata do cristalino, lesões cutâneas, comprometimento da medula óssea com consequente redução na produção de células sanguíneas, além de infertilidade devido à destruição das células germinativas (Navarro *et al.*, 2008; Homann, 2014). A severidade desses efeitos aumenta proporcionalmente à dose absorvida e, em casos de exposição aguda a doses elevadas, pode ocorrer a Síndrome Aguda da Radiação (SAR), caracterizada por danos sistêmicos severos que podem resultar em óbito (ICRP, 2007).

Os efeitos estocásticos, por sua vez, não possuem um limiar mínimo de dose, sendo sua ocorrência baseada em um modelo probabilístico. Diferentemente dos

efeitos determinísticos, eles não se manifestam imediatamente após a exposição, mas podem se desenvolver ao longo do tempo. Entre as principais consequências, destaca-se o aumento da incidência de câncer e mutações genéticas hereditárias. A relação entre a dose de radiação e a probabilidade de ocorrência desses efeitos segue um comportamento probabilístico, onde doses mais elevadas aumentam o risco de neoplasias e outras alterações genéticas (Sachs; Hlatky, 1990; Homann, 2014).

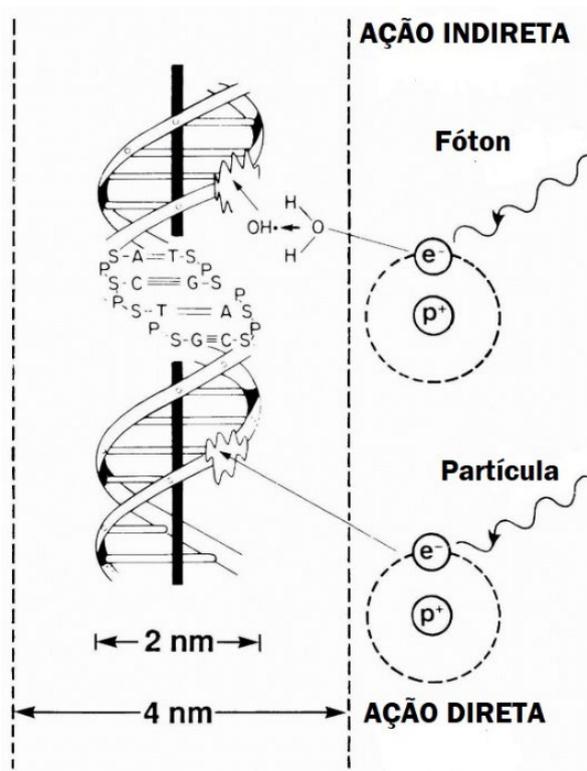
A interação da radiação ionizante com células biológicas pode ocorrer de forma direta ou indireta. No primeiro caso, a radiação interage diretamente com moléculas de DNA, promovendo quebras nas cadeias nucleotídicas e danos cromossômicos, podendo comprometer a estabilidade genética celular (Andrade; Bauermann, 2010). No segundo caso, a radiação ioniza moléculas de água presentes no citoplasma celular, formando radicais livres altamente reativos, como a hidroxila ( $\text{OH}\cdot$ ), que podem induzir danos ao DNA e a outras estruturas intracelulares, aumentando o risco de mutações e morte celular (Hall; Giaccia, 2019).

Os efeitos biológicos da radiação também variam conforme o tipo de radiação ionizante. As partículas alfas, por exemplo, possuem alta transferência de energia linear (do Inglês, LET) e, apesar de terem baixo poder de penetração, causam danos celulares severos quando absorvidas pelo organismo. Em contrapartida, as radiações beta e gama possuem LET mais baixo, mas apresentam maior capacidade de penetração nos tecidos, podendo gerar impactos em órgãos internos (Andrade; Bauermann, 2010).

O estudo dos efeitos biológicos da radiação é essencial para o desenvolvimento de normas de proteção radiológica e para a formulação de diretrizes de segurança ocupacional e ambiental. Modelos epidemiológicos como os estudos denominados Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR), os BEIR V (altas doses, acima de 100 mSv) e BEIR VII (baixas doses, abaixo de 100 mSv) são amplamente utilizados para estimar o risco de câncer radioinduzido em populações expostas (NRC, 2006). O BEIR V, baseado em pesquisas realizadas com os sobreviventes dos bombardeios nucleares no Japão, fornece estimativas quantitativas sobre a relação entre a exposição de corpo inteiro à radiação ionizante e o desenvolvimento de diferentes tipos de câncer (IAEA, 1996). Já o BEIR VII adota um modelo linear sem limiar (LNT), que considera a possibilidade de efeitos biológicos mesmo em doses muito baixas de radiação. Tal modelo leva em conta os fatores idade, sexo e tempo de exposição para avaliar os riscos individuais associados à radiação (NRC, 2006).

A compreensão dos efeitos biológicos da radiação ionizante é fundamental para a proteção da saúde pública e para o aprimoramento de estratégias de mitigação dos riscos radiológicos. Como ilustrado na Figura 1, a interação da radiação com o DNA pode ocorrer por meio de ações diretas ou indiretas, resultando em danos celulares que podem levar a mutações genéticas, morte celular ou desenvolvimento de neoplasias. O aprofundamento desses estudos permite a adoção de medidas mais eficazes na prevenção dos impactos adversos da radiação em diferentes contextos, como na medicina, na indústria e no meio ambiente.

**Figura 1— Esquema simplificado das ações diretas e indiretas de radiações no modelo clássico radiobiológico de interação com o DNA**



Fonte: Andrade e Bauermann (2010)

## 2.6 Modelagem Computacional e Ferramentas de Análise

A modelagem computacional desempenha um papel essencial na previsão e avaliação dos impactos radiológicos em áreas urbanas, especialmente na dispersão de contaminantes atmosféricos e na avaliação dos danos a infraestruturas críticas. Métodos avançados, como o modelo gaussiano, aliados a ferramentas geoespaciais, fornecem suporte para a tomada de decisão em emergências radiológicas (Andrade,

2021). Conforme destacado por Baggett e Stout (2022), a análise de risco em infraestruturas urbanas exige uma abordagem metodológica estruturada, que considere vulnerabilidades interdependentes e cenários de falha em cascata. Este capítulo aborda três principais abordagens computacionais aplicadas a eventos radiológicos: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2, Modelo Gaussiano e QGIS.

O software HotSpot Health Physics Codes v3.1.2, desenvolvido pelo Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), é amplamente reconhecido no campo da segurança radiológica por sua capacidade de simular a dispersão atmosférica de materiais radioativos. A ferramenta emprega o modelo gaussiano de dispersão, um método consolidado na literatura para prever a concentração de contaminantes no ambiente e calcular doses de radiação em função da distância. Seu uso é aplicável tanto na avaliação de segurança de instalações nucleares quanto na análise de incidentes radiológicos, incluindo a detonação de dispositivos de dispersão radiológica (RDD) (Homann, 2019).

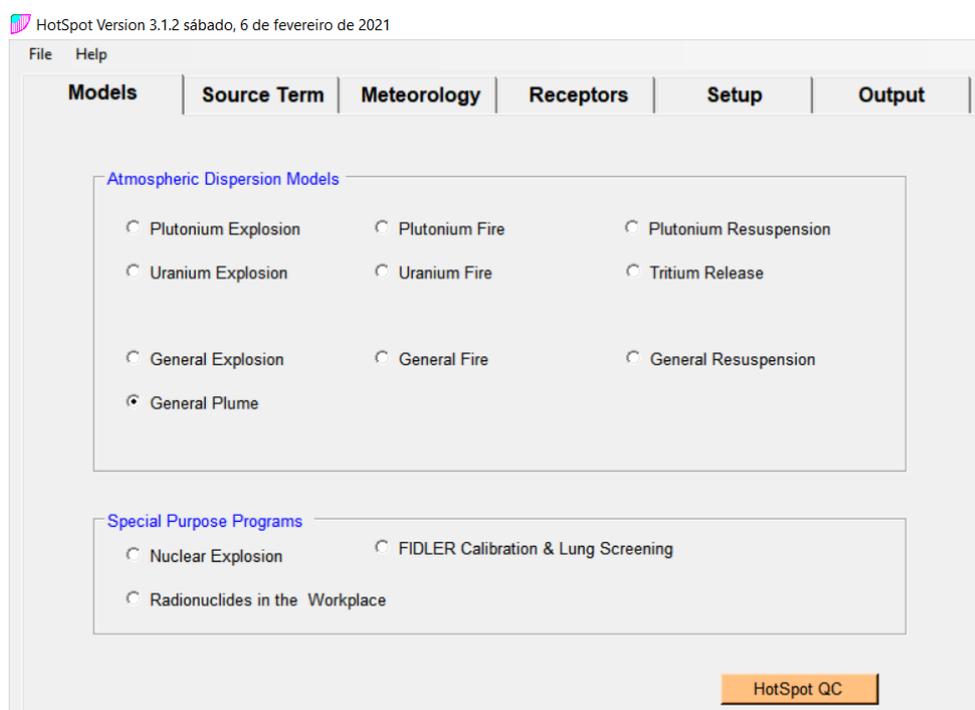
O HotSpot possui quatro principais módulos de simulação: Pluma, Explosão, Fogo e Ressuspensão. Cada um desses módulos é projetado para estimar os impactos ambientais e biológicos de liberações radioativas, sendo particularmente útil para estudos preliminares devido à sua rapidez na obtenção de resultados (DOE, 2003; Homann, 2020). A funcionalidade do módulo "Explosão Nuclear" merece destaque, pois permite simular os efeitos imediatos de dispositivos nucleares improvisados (IND), abrangendo desde a propagação da pluma contaminada até os efeitos térmicos e mecânicos associados ao evento.

Os cálculos realizados pelo HotSpot consideram parâmetros-chave essenciais para estimativas conservadoras, incluindo a fração respirável do material, que permite avaliar o potencial de inalação de partículas radioativas pela população exposta. A fração aerotransportada, que estima a quantidade de material radioativo que se mantém suspenso no ar após a detonação. Os fatores de vazamento, que indicam a eficiência da dispersão do material radioativo considerando fatores meteorológicos e estruturais.

A ampla utilização e credibilidade científica do HotSpot o tornam uma ferramenta indispensável em estudos sobre eventos radiológicos urbanos, permitindo que pesquisadores realizem análises rápidas e confiáveis para subsidiar estratégias de mitigação e resposta emergencial (Homann, 2019).

O software se destaca por sua interface intuitiva, que facilita a operação por usuários de diferentes níveis de experiência. A sequência lógica de uso segue uma estrutura da esquerda para a direita, com abas organizadas, permitindo que cada etapa da simulação seja documentada e revisada antes da geração dos relatórios. As figuras 2 a 7 ilustram as principais telas do HotSpot Health Physics Codes v3.1.2, apresentando sua organização e usabilidade.

**Figura 2— Tela inicial com os modelos disponíveis**



Fonte: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2

**Figura 3— Tela de entrada de dados do termo-fonte**

HotSpot Version 3.1.2 sábado, 6 de fevereiro de 2021

File Help

Models Source Term Meteorology Receptors Setup Output

Model : General Plume

Radionuclide  
UserMix dez 7, 2020 09 47 03 TESE EDSC  
Change Radionuclide Source Term

Damage Ratio (DR)  
1,000

Effective Release Height  
0 m

Leakpath Factor  
1,000

Calculate Plume Rise

Fonte: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2

**Figura 4— Tela de seleção de dados meteorológicos**

HotSpot Version 3.1.2 sábado, 6 de fevereiro de 2021

File Help

Models Source Term Meteorology Receptors Setup Output

10-meter Wind Speed  
3,00 m/s

Display Wind Chart

Selected Stability Class  
A

Wind Direction  
270  
Wind from the West

Atmospheric Stability  
Enter Solar Information - or - Enter the Actual Stability

Sun High in the sky  
 Sun Low in the sky or cloudy  
 Night

A - Very unstable  
 B - Moderately unstable  
 C - Slightly unstable  
 D - Neutral  
 E - Slightly stable  
 F - Moderately stable  
 G - Special nighttime (low wind)

Fonte: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2

Figura 5— Tela de seleção de localização de receptores

HotSpot Version 3.1.2 sábado, 6 de fevereiro de 2021

File Help

Models Source Term Meteorology **Receptors** Setup Output

10-meter Wind Speed: 3,00 m/s  Display Wind Chart Selected Stability Class: A

Wind Direction: 270 Wind from the West

Atmospheric Stability

Enter Solar Information - or - Enter the Actual Stability

Sun High in the sky  A - Very unstable  
 Sun Low in the sky or cloudy  B - Moderately unstable  
 Night  C - Slightly unstable  
 D - Neutral  
 E - Slightly stable  
 F - Moderately stable  
 G - Special nighttime (low wind)

Fonte: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2

Figura 6— Tela para se customizar os relatórios e mapas de saída

HotSpot Version 3.1.2 sábado, 6 de fevereiro de 2021

File Help

Models Source Term Meteorology Receptors **Setup** Output

Terrain:  Standard/Rural (Conservative)  Input Surface Roughness  City/Metropolitan Area

Sample Time: 10 min Radiological Units:  Classic (rem, rad, Ci)  SI (Sievert, Gray, Bq) Distance Units:  Metric  English

Wind Input Height: 10 meters Source Geometry:  Simple  Complex

Mixing Layer:  Enable Inversion Non-respirable Deposition Velocity: 8 cm/sec

Explosion Model ARF Distribution: Default HotSpot Vertical ARF  Change/View ARF Distribution

Holdup Time: 0 min Wet Deposition:  Enable Rainout

Ground Shine & Resuspension:  Include Ground Shine (Weathering Correction Factor : None)  Include Resuspension (Resuspension: If checked, all output dose data will include Ground Shine for the indicated exposure duration. Exposure Time: (Start: 0,00 days; Duration: 4,00 days)  Change Exposure Parameters

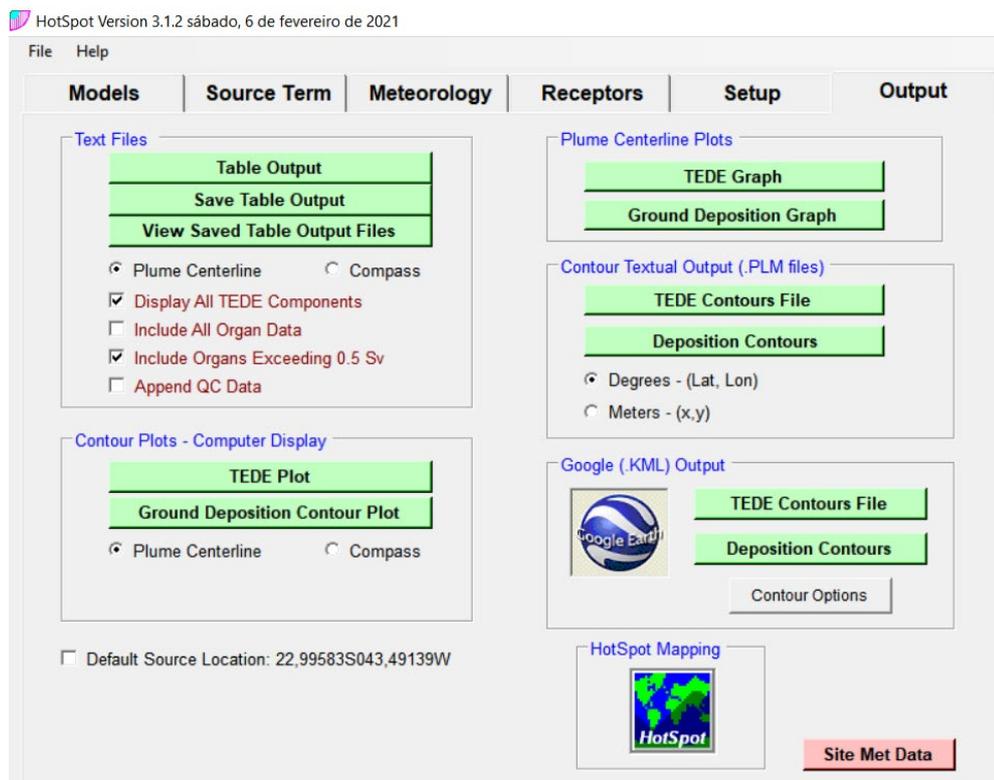
DCF Library:  FGR 11  FGR 13  Acute (30-days) options

Contours: TEDE (Sv) Inner: 0,70 Middle: 0,10 Outer: 0,05 Deposition (kBq/m2) Inner: 100,00 Middle: 50,00 Outer: 1,00 Color Options

Breathing Rate: 3,33E-04 m3/s

Fonte: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2

**Figura 7— Tela de solicitação de dados de saída**



Fonte: HotSpot Health Physics Codes v3.1.2

O modelo gaussiano dentro do HotSpot Health Physics, é um dos métodos mais utilizados para prever a dispersão de contaminantes atmosféricos, incluindo radionuclídeos liberados em eventos radiológicos. Esse modelo matemático considera que a dispersão ocorre segundo uma distribuição normal, permitindo estimar a concentração de radiação em diferentes pontos e momentos (Hanna; Briggs; Hosker, 1982).

A dose de passagem da pluma refere-se à exposição acumulada de um indivíduo ou infraestrutura durante a passagem de uma nuvem radioativa sobre uma determinada região. Esse conceito é crucial para a análise de riscos, pois permite estimar as doses absorvidas em curto prazo, possibilitando a tomada de decisão emergencial (Hall; Giaccia, 2019).

A dispersão de contaminantes no ar depende fortemente das condições atmosféricas, especialmente da classe de estabilidade Pasquill-Gifford (PG). Essa classificação determina a difusividade vertical e horizontal da pluma radioativa com base em fatores como velocidade do vento, turbulência atmosférica e radiação solar (Pasquill, 1961). O HotSpot adota esse modelo para classificar a dispersão,

garantindo simulações realistas da pluma radioativa. A equação que define a concentração de contaminantes no modelo gaussiano é dada por:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad 204$$

onde C é a concentração (Bq-s)/(m<sup>3</sup>), Q é a atividade da fonte de radiação (Bq), H é a altura de liberação efetiva (m), λ é o fator físico de decaimento radioativo (s<sup>-1</sup>), x, y e z estão relacionados com o vento a favor, vento cruzado e distância vertical (m), σ<sub>y</sub> e σ<sub>z</sub> representam os desvios padrão da distribuição de concentração nas direções horizontal e vertical (m), u é a velocidade média do vento na altura efetiva de liberação (m/s) e DF(x) é o fator de depleção da pluma de contaminação radioativa (Homann, 2019).

A Tabela 3 apresenta as condições meteorológicas associadas às categorias de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford, que determinam a dispersão dos radionuclídeos.

**Tabela 3—** Condições meteorológicas para classificação da estabilidade atmosférica de categorias de A a F utilizadas no HotSpot

Velocidade do vento (m/s)	Alta Insolação	Baixa Insolação	Noturno
< 2	A	B	F
2 – 3	A	C	E
3 – 4	B	C	D
4 – 6	C	D	D
> 6	C	D	D

Fonte: Homann (2019)

Já o QGIS (*Quantum Geographic Information System*) é um software de código aberto amplamente utilizado para mapeamento geoespacial, permitindo a análise da dispersão de contaminantes radioativos. Sua integração com bancos de dados geográficos possibilita a sobreposição de mapas de risco radiológico com infraestruturas urbanas, contribuindo para o planejamento de resposta a emergências (QGIS, 2023).

A utilização do QGIS em estudos radiológicos possibilita:

- a) Georreferenciamento de áreas contaminadas por material radioativo.
- b) Sobreposição de camadas de dispersão com mapas urbanos, permitindo a identificação de infraestruturas críticas dentro da zona de impacto.
- c) Cálculo de áreas de risco baseando-se em modelos de dispersão como o HotSpot.
- d) Geolocalização das infraestruturas urbanas críticas

Devido à sua flexibilidade e compatibilidade com modelos computacionais de dispersão, o QGIS é amplamente utilizado por pesquisadores para visualizar e quantificar impactos radiológicos em cenários urbanos.

## 3 MÉTODOS

### 3.1 Delimitação de Escopo

A definição do escopo é essencial para garantir a aplicabilidade e confiabilidade dos resultados obtidos em análises de riscos radiológicos. Este estudo tem como objetivo estimar os impactos ambientais e humanos decorrentes da exposição à radiação gama, considerando um cenário urbano sob a influência da detonação de um dispositivo nuclear tático.

Além disso, a pesquisa avalia o papel dos elementos estruturais urbanos na atenuação das doses de radiação que podem desencadear efeitos determinísticos. Essa abordagem baseia-se nos estudos de Andrade *et al.* (2020), que enfatizam a importância da interação entre os componentes do ambiente urbano e os riscos radiológicos. Compreender essas interações é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e alocação eficiente de recursos em emergências radiológica (Homann, 2019).

### 3.2 Simulação com HotSpot e Modelo Gaussiano

As simulações foram conduzidas com o software HotSpot Health Physics Codes v3.1.2, ferramenta desenvolvida pelo Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), que emprega o modelo gaussiano de dispersão para prever a distribuição de contaminantes atmosféricos radioativos (Homann, 2019). O modelo é amplamente utilizado para estimativas conservadoras das concentrações de radionuclídeos e para o cálculo da dose equivalente efetiva total (TEDE), que considera tanto a exposição externa quanto a interna (DOE, 2003).

Para este estudo, foram definidas as seguintes configurações. A explosão de 12 kg de TNT equivalente foi utilizada para representar um cenário realista de dispersão radiológica (RDD). O tempo de amostragem de 10 minutos foi adotado para capturar os efeitos iniciais da dispersão. A velocidade do vento foi fixada em 3 m/s, dentro das classes de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG). A altura do receptor foi estabelecida em 1,5 m, representando a média da inalação humana.

O radionuclídeo utilizado foi o césio-137 (Cs-137), com atividade inicial de  $2,59\text{E}+14$  Bq, devido à sua ampla aplicação industrial e longa meia-vida de 30 anos

(IAEA, 1990). Foram adotadas suposições conservadoras, como fração aerotransportada, respirável e de vazamento igual a 1, para garantir um cenário de máxima liberação do material radioativo.

Embora o modelo gaussiano seja adequado para estimativas iniciais, ele apresenta limitações ao considerar geometrias urbanas complexas e interações fluidodinâmicas detalhadas. Por isso, os resultados gerados são considerados conservadores, mas suficientes para a avaliação preliminar dos impactos radiológicos e a formulação de estratégias de segurança.

As variações nas classes de estabilidade atmosférica, conhecidas como classes Pasquill-Gifford (PG), desempenham um papel fundamental na dispersão do material radioativo em um cenário urbano. Cada classe PG, caracterizada por diferentes condições de estabilidade atmosférica, influencia diretamente a forma e a extensão da pluma de contaminação, afetando assim o nível de risco radiológico ao qual as infraestruturas críticas estão expostas. Além disso, estudos recentes indicam que a urbanização pode atenuar os impactos radiológicos, pois edificações e outras estruturas atuam como barreiras físicas, reduzindo a dispersão da radiação e minimizando a exposição da população e das infraestruturas críticas (Machado *et al.*, 2024). Tal efeito tem implicações diretas para a formulação de estratégias de mitigação e resposta emergencial em cenários de dispersão radiológica.

### **3.3 Zonas de Efeito Determinístico**

As simulações realizadas com o software HotSpot geram tabelas que permitem aos usuários selecionarem manualmente os resultados desejados, que podem ser analisados por meio de métodos gráficos suplementares. No estudo original, o nível de dose de radiação de 700 mSv foi escolhido como o principal foco de análise, conforme figura 1, uma vez que esse nível corresponde ao início dos primeiros sintomas e efeitos fisiológicos observáveis em caso de exposição aguda de corpo inteiro a curto prazo (Thaul, 1999). No entanto, para uma análise mais abrangente e contextualizada, este estudo também considera os níveis de dose de 500 mSv e 100 mSv.

- a) Dose de 700 mSv: Este nível de dose é crítico, pois está associado ao início de efeitos determinísticos severos, como a Síndrome Aguda

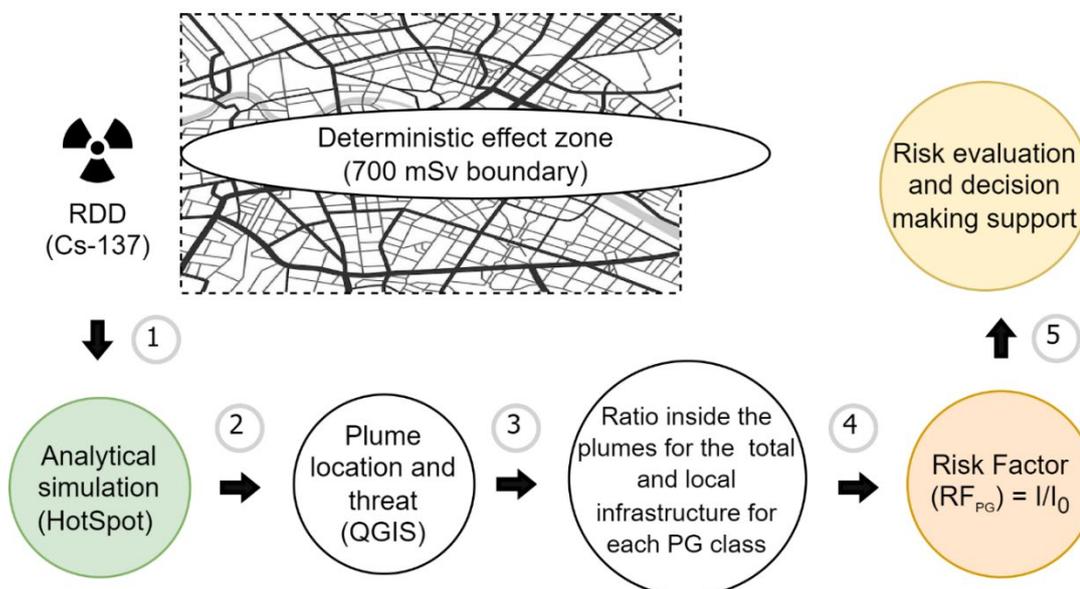
da Radiação (SAR). Portanto, a análise dessa zona é essencial para o planejamento de evacuações imediatas e outras medidas de emergência rigorosas.

b) Dose de 500 mSv: Considerada uma dose intermediária, 500 mSv ainda apresenta um risco significativo de efeitos determinísticos, embora menos graves do que os observados em 700 mSv. Avaliar essa dose permite expandir a análise para incluir uma faixa mais ampla de impacto, onde medidas de mitigação podem ser necessárias, mas não tão urgentes quanto para a dose de 700 mSv.

c) Dose de 100 mSv: Este nível de dose é utilizado para capturar cenários de exposição de baixo risco, onde os efeitos determinísticos são menos prováveis, mas o risco de efeitos estocásticos, como aumento da probabilidade de câncer, ainda é relevante. Esta análise é fundamental para o planejamento de medidas preventivas e de longo prazo.

Os valores das doses calculados pelo HotSpot foram associados à distância do ponto de detonação ao longo do eixo maior da elipse gerada na simulação de contaminação, representando a pluma de contaminação radioativa sobre a área específica de estudo. Essa pluma pode ser georreferenciada para fornecer uma visualização precisa das zonas de impacto. Para tornar as simulações mais realistas, o software QGIS foi utilizado para projetar os dados das plumas contaminadas no terreno. O QGIS, um sistema de informações geográficas (SIG) de código aberto, é licenciado sob a Licença Pública Geral GNU e é um projeto oficial da Fundação Geoespacial de Código Aberto (OSGeo), sendo adequado para conduzir estudos de impacto ambiental (Geri *et al.*, 2017).

**Figura 8—** Esquema metodológico geral



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 3.4 Avaliação do Impacto e Vulnerabilidade das Infraestruturas Críticas

A avaliação do impacto e da vulnerabilidade das infraestruturas críticas em cenários de risco radiológico é essencial para a gestão de emergências e a formulação de estratégias de mitigação. Quando expostas a eventos adversos, essas infraestruturas podem ter seu funcionamento comprometido, o que afeta a continuidade dos serviços essenciais, a segurança pública e a resiliência urbana. Para mensurar esses impactos, diferentes métricas são utilizadas, permitindo uma análise quantitativa da vulnerabilidade e da distribuição do risco na área afetada.

O Fator de Risco (RF) é um indicador que expressa a proporção de infraestruturas críticas expostas ao risco radiológico em relação ao total de instalações existentes na área urbana analisada. Sua fórmula é representada por:

$$RF_{PG} = \frac{I}{I_0} \quad 05$$

Em que  $I$  é o número de infraestruturas situadas dentro da zona de risco e  $I_0$  representa o total de infraestruturas na região. Esse método facilita a avaliação da

vulnerabilidade ao considerar a exposição proporcional ao risco, auxiliando no planejamento de respostas emergenciais e na alocação de recursos.

Complementarmente, o Fator de Impacto Total (FIT) quantifica o impacto acumulado sobre as infraestruturas críticas dentro da zona de risco. Essa métrica é obtida pela soma dos fatores de risco individuais, considerando diferentes classes de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG), conforme a equação:

$$FIT = \sum RF_{PG} \quad 06$$

Onde  $RF_{PG}$  é o Fator de Risco para cada classe de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG).

Esse indicador permite uma visão ampla do impacto global, possibilitando a priorização de medidas corretivas com base na gravidade do cenário.

A avaliação da vulnerabilidade é aprofundada pelo Índice de Vulnerabilidade (IV), que incorpora pesos distintos para cada infraestrutura, refletindo sua importância relativa na gestão de emergências. Esse índice é calculado pela equação:

$$IV = \frac{\sum(\text{Peso} \times RF_{PG})}{\sum(\text{Pesos})} \quad 07$$

onde *Peso* representa o peso atribuído a cada infraestrutura com base na sua criticidade ou importância relativa.  $RF_{PG}$  é o Fator de Risco para cada classe de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG).

Cada infraestrutura recebe um peso específico de acordo com sua criticidade. Esse método ponderado proporciona uma análise mais precisa, auxiliando na definição de prioridades para a adoção de medidas mitigadoras.

Para compreender a distribuição do risco e sua variabilidade, são empregadas métricas estatísticas. O Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) mede a dispersão dos fatores de risco em relação à média, sendo calculado por:

$$DPFR = \sqrt{\frac{\sum(RF_{PG} - \mu)^2}{N}} \quad 08$$

$RF_{PG}$  representa o Fator de Risco para cada classe de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG),  $\mu$  é a média dos fatores de risco e N é o número total de fatores de risco considerados.

Essa métrica é essencial para identificar áreas com maior incerteza na distribuição dos impactos. Além disso, a Mediana dos Fatores de Risco (MFR), expressa como:

$$\text{MFR} = \text{Mediana}(RF_{PG}) \quad 09$$

Onde  $RF_{PG}$  representa o Fator de Risco para cada classe de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG).

É um indicador robusto da tendência central, útil em cenários onde há grande variação nos fatores de risco ou a presença de valores extremos.

A determinação dos pesos das infraestruturas, conforme detalhada na tabela 4, foi baseada na sua criticidade operacional em cenários de risco radiológico. Infraestruturas de saúde, como hospitais e serviços de emergência (SAMU e Corpo de Bombeiros), receberam peso 5, devido ao seu papel essencial na resposta imediata a crises. Rodovias, fundamentais para a evacuação e o deslocamento de equipes de emergência, receberam peso 4. Subestações de energia, que garantem a continuidade do fornecimento elétrico para hospitais e outros serviços essenciais, foram classificadas com peso 3. Delegacias, que desempenham um papel importante na manutenção da ordem pública, foram atribuídas com peso 2. Escolas, por sua menor influência direta na resposta emergencial, receberam peso 1.

**Tabela 4—** Pesos das Infraestruturas

<b>Infraestrutura</b>	<b>Peso</b>
<b>Hospitais</b>	5
<b>Bombeiros</b>	5
<b>SAMU</b>	5
<b>Rodovias</b>	4
<b>Subestações de Energia</b>	3
<b>Delegacias</b>	2
<b>Escolas</b>	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A atribuição dos pesos apresentados na Tabela 4 foi realizada com base em uma análise qualitativa e técnica da importância funcional de cada tipo de infraestrutura crítica no contexto de um cenário de emergência radiológica urbana. Dada a inexistência de parâmetros normativos ou diretrizes técnicas consolidadas que estabeleçam coeficientes padronizados de criticidade ou vulnerabilidade para essas estruturas, optou-se por construir uma escala própria de avaliação, fundamentada no papel que cada infraestrutura exerce na proteção da vida, na mobilidade urbana e na manutenção de serviços essenciais.

Hospitais, unidades do SAMU e Corpo de Bombeiros receberam peso máximo (5), por representarem os principais agentes de resposta imediata a vítimas expostas à radiação e por prestarem serviços essenciais à preservação da vida humana. Rodovias foram classificadas com peso 4, em razão de sua função estratégica na evacuação da população e no deslocamento de equipes de emergência. Subestações de energia, por sua relevância para o funcionamento contínuo de equipamentos médicos, sistemas de comunicação e iluminação pública, receberam peso 3. Delegacias foram atribuídas peso 2, considerando seu papel no suporte à segurança e organização social em situações de crise. Escolas, ainda que relevantes como espaços de aglomeração populacional, foram ponderadas com peso 1, tendo em vista seu papel secundário na resposta imediata a desastres.

Embora os valores atribuídos não estejam ancorados em referenciais quantitativos externos, buscou-se manter coerência lógica e hierárquica, conforme os princípios da gestão de riscos e da defesa civil. Essa abordagem, embora subjetiva, permitiu o desenvolvimento de um **Índice de Vulnerabilidade** adequado ao escopo da presente pesquisa, oferecendo uma ferramenta inicial para a priorização de áreas críticas em cenários de contaminação radiológica urbana.

Além dos aspectos estruturais, fatores ambientais também influenciam o risco associado a eventos radiológicos. A direção predominante dos ventos é um dos elementos determinantes para a dispersão de contaminantes no ambiente. Na área de estudo, os dados meteorológicos indicam uma predominância dos ventos na direção leste, sendo essa característica incorporada à modelagem da dispersão de contaminantes (INMET, [s.d.]). Considerar esse fator permite estimar com maior precisão as áreas potencialmente impactadas, possibilitando um planejamento mais eficiente das estratégias de mitigação e resposta.

A combinação dessas métricas oferece uma visão ampla e detalhada sobre a vulnerabilidade e o impacto potencial dos eventos radiológicos sobre infraestruturas críticas. Esse tipo de análise é essencial para embasar a tomada de decisões estratégicas voltadas à redução dos impactos, fortalecendo a resiliência das áreas urbanas e garantindo maior segurança à população.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise do Impacto das Plumas Radiológicas nas Infraestruturas Críticas

As simulações realizadas neste estudo foram projetadas utilizando o software HotSpot, em conjunto com o QGIS, para avaliar o impacto das condições atmosféricas sobre infraestruturas críticas urbanas após a dispersão de material radioativo. As simulações basearam-se em um modelo Gaussiano de dispersão atmosférica, considerando diferentes níveis de dose de radiação ( $7,00E-01$  Sv,  $1,00E-01$  Sv e  $5,00E-02$  Sv) e as classes de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG). As plumas resultantes dessas simulações foram sobrepostas a uma área urbana georreferenciada, permitindo a interseção das plumas com as infraestruturas críticas.

#### 4.1.1 Impacto Geral das Plumas Radiológicas

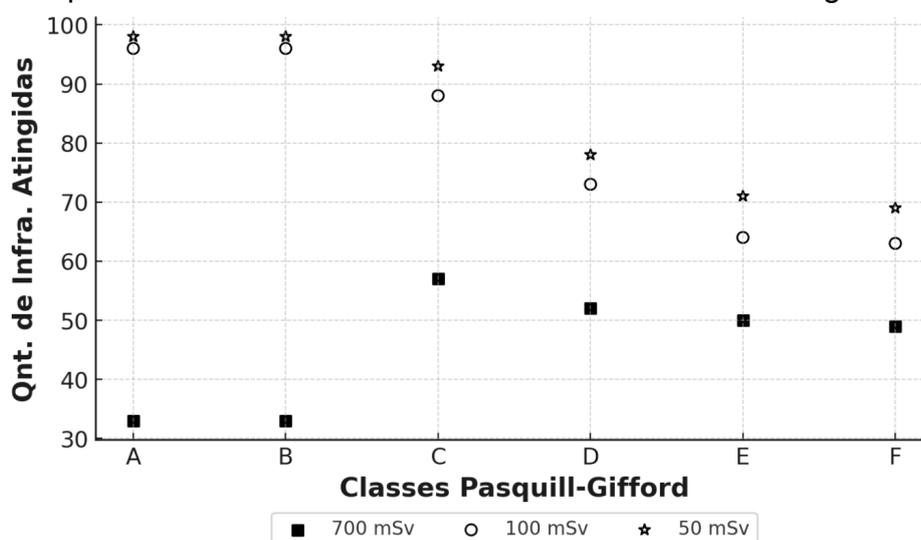
A dispersão de material radioativo em ambientes urbanos é fortemente influenciada pelas condições atmosféricas, representadas pelas classes Pasquill-Gifford (PG), que determinam a estabilidade da atmosfera e, conseqüentemente, o comportamento da pluma radioativa. Os resultados indicam que as plumas de  $7,00E-01$  Sv,  $1,00E-01$  Sv e  $5,00E-02$  Sv apresentam comportamentos distintos, com maior número de infraestruturas atingidas em condições de instabilidade atmosférica (classes A e B) e redução progressiva do impacto à medida que a estabilidade aumenta (classes E e F). Esse comportamento reflete o fato de que atmosferas instáveis favorecem uma dispersão ampla dos contaminantes, enquanto atmosferas mais estáveis tendem a manter a contaminação concentrada em uma área mais restrita.

No caso da pluma de  $7,00E-01$  Sv, observa-se um aumento significativo no número de infraestruturas impactadas entre as classes A e C, atingindo um pico de 57 infraestruturas afetadas na classe C. Escolas são as infraestruturas mais impactadas nesse cenário, seguidas por hospitais e rodovias. A partir da classe D, verifica-se uma redução gradual no total de infraestruturas atingidas, chegando a 49 infraestruturas na classe F, o que indica uma concentração maior da pluma nessas condições. Para a pluma de  $1,00E-01$  Sv, o impacto é ainda mais expressivo, com 96

infraestruturas afetadas nas classes A e B. Esse número diminui à medida que a estabilidade atmosférica aumenta, atingindo 63 infraestruturas na classe F, o que confirma a relação direta entre a estabilidade da atmosfera e a dispersão do material radioativo. O padrão observado na pluma de  $5,00E-02$  Sv é similar, mas apresenta um impacto ligeiramente menor, com 98 infraestruturas atingidas nas classes A e B, reduzindo-se gradativamente até 69 infraestruturas na classe F.

Comparando os três cenários, percebe-se que a severidade da pluma não implica necessariamente um impacto proporcionalmente maior sobre as infraestruturas urbanas. Fatores como estabilidade atmosférica, velocidade do vento e características urbanas desempenham um papel determinante na dispersão da radiação. Escolas são, de forma recorrente, as infraestruturas mais vulneráveis, sendo significativamente impactadas em todas as classes atmosféricas analisadas. Hospitais, rodovias e subestações de energia também apresentam alta exposição ao material radioativo, especialmente em atmosferas instáveis, que favorecem uma dispersão mais ampla. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias de mitigação e planejamento emergencial que considerem as particularidades de cada classe de estabilidade atmosférica, garantindo que as infraestruturas críticas sejam protegidas de maneira eficiente e que os planos de resposta a emergências radiológicas sejam adaptados às condições atmosféricas predominantes. A Figura 9 apresenta o impacto das condições atmosféricas sobre o número total de infraestruturas críticas urbanas afetadas após a liberação de material radioativo.

**Figura 9—** Impacto Geral das Plumias – Total de Infraestrutura atingida



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

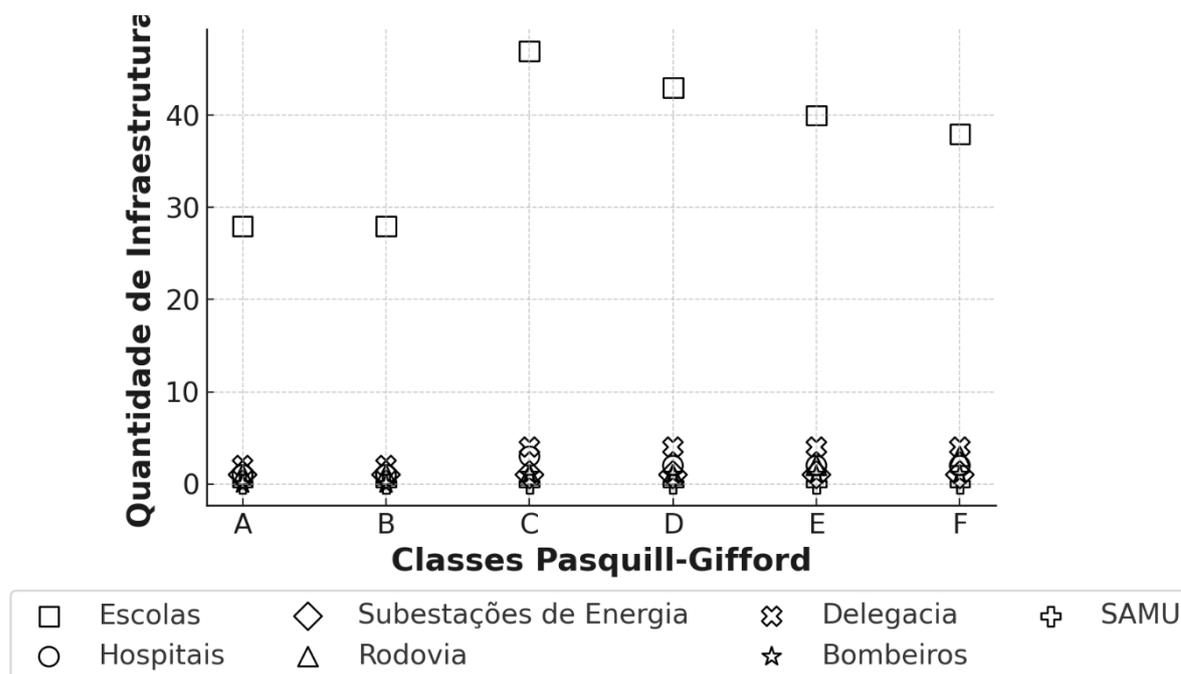
#### 4.1.2 Impacto por Tipo de Infraestrutura

A dispersão do material radioativo afeta as infraestruturas críticas de maneira desigual, dependendo da classe de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford (PG). As escolas foram as mais impactadas em todos os cenários, especialmente nas classes C e D, onde o número de unidades afetadas aumentou significativamente. Esse comportamento indica que a estabilidade atmosférica moderada favorece a dispersão horizontal da pluma, ampliando a área contaminada. Os hospitais, embora menos afetados que as escolas, também apresentaram aumento na exposição, sugerindo que sua localização está associada a regiões suscetíveis à dispersão radioativa. Rodovias e subestações de energia, por sua vez, demonstraram um impacto relativamente homogêneo, indicando que essas infraestruturas mantêm um nível de exposição estável independentemente da estabilidade atmosférica.

Delegacias, corpo de bombeiros e unidades do SAMU apresentaram menor impacto, com um número reduzido de instalações afetadas em todas as classes atmosféricas. No entanto, seu papel na resposta emergencial a eventos radiológicos torna sua vulnerabilidade um fator crítico a ser considerado. Observa-se que o número de delegacias afetadas aumenta ligeiramente nas classes C a F, sugerindo que esses edifícios estão localizados em áreas onde a concentração de material radioativo pode ser maior sob determinadas condições atmosféricas. Esse impacto pode comprometer a coordenação de respostas emergenciais, exigindo planos de contingência específicos para garantir a operacionalidade desses serviços.

A Figura 10 apresenta os resultados da pluma de  $7,00E-01$  Sv, evidenciando a predominância do impacto sobre escolas e a distribuição dos efeitos em outras infraestruturas críticas. Esses achados reforçam a necessidade de estratégias preventivas que considerem a dispersão atmosférica e a vulnerabilidade de setores essenciais na resposta a desastres radiológicos.

**Figura 10**— Impacto da Pluma 700 mSv



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

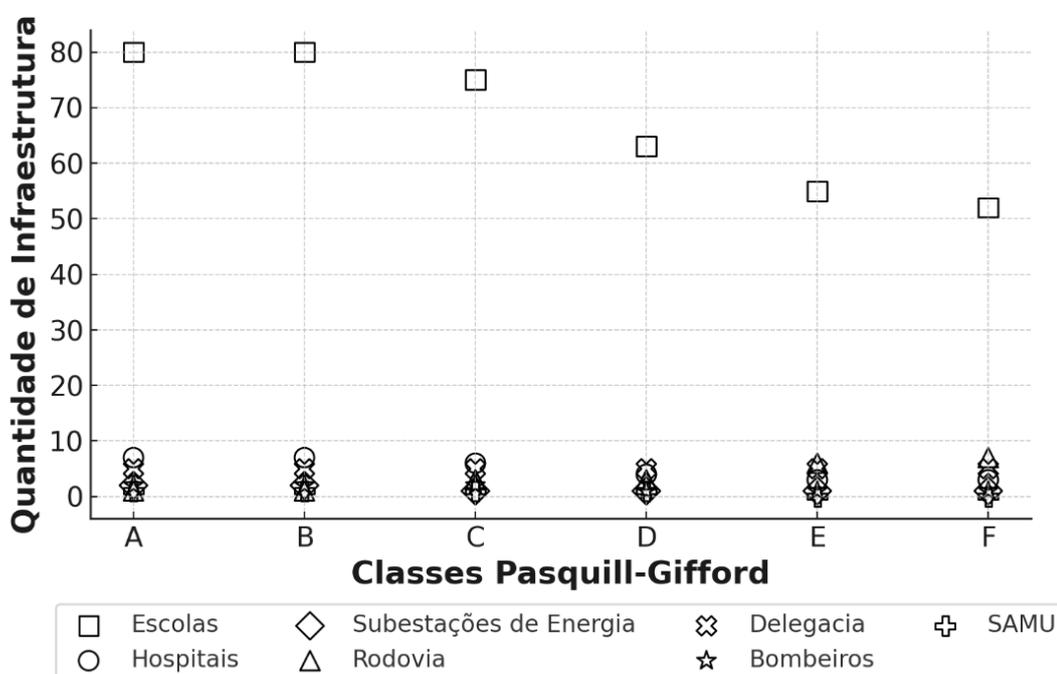
A dispersão da pluma de 50 mSv apresentou padrões de impacto semelhantes aos observados em plumas de maior intensidade, com as escolas sendo novamente as infraestruturas mais afetadas. Em condições atmosféricas instáveis (classes A e B), foram registradas 80 unidades escolares impactadas, enquanto, nas classes mais estáveis (E e F), o número reduz para 55 e 52, respectivamente. Esse comportamento confirma a tendência de que a dispersão inicial amplia a zona de impacto sob instabilidade atmosférica, enquanto a estabilidade restringe a área afetada, mas pode elevar a concentração local do material radioativo. Os hospitais também foram significativamente impactados, embora em menor escala, com redução progressiva do impacto à medida que a estabilidade atmosférica aumenta.

As rodovias e subestações de energia permaneceram relativamente estáveis em sua exposição, indicando que sua vulnerabilidade não é tão sensível às variações das classes Pasquill-Gifford quanto as escolas e hospitais. Por outro lado, as delegacias mantiveram um número constante de cinco unidades afetadas em todas as classes, sugerindo que essas infraestruturas estão distribuídas de forma homogênea em relação às áreas impactadas. O corpo de bombeiros e as unidades do SAMU apresentaram uma leve redução no número de instalações afetadas à

medida que a estabilidade atmosférica aumentou, reforçando a importância de medidas preventivas para garantir sua operação eficiente.

A Figura 11 apresenta os resultados da pluma de 50 mSv, evidenciando a predominância do impacto sobre escolas e a progressiva redução de infraestruturas afetadas em cenários de maior estabilidade atmosférica. Esses resultados destacam a necessidade de um planejamento estratégico para a proteção das infraestruturas essenciais, assegurando a continuidade dos serviços em um eventual evento radiológico.

**Figura 11—** Impacto da Pluma 50 mSv



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

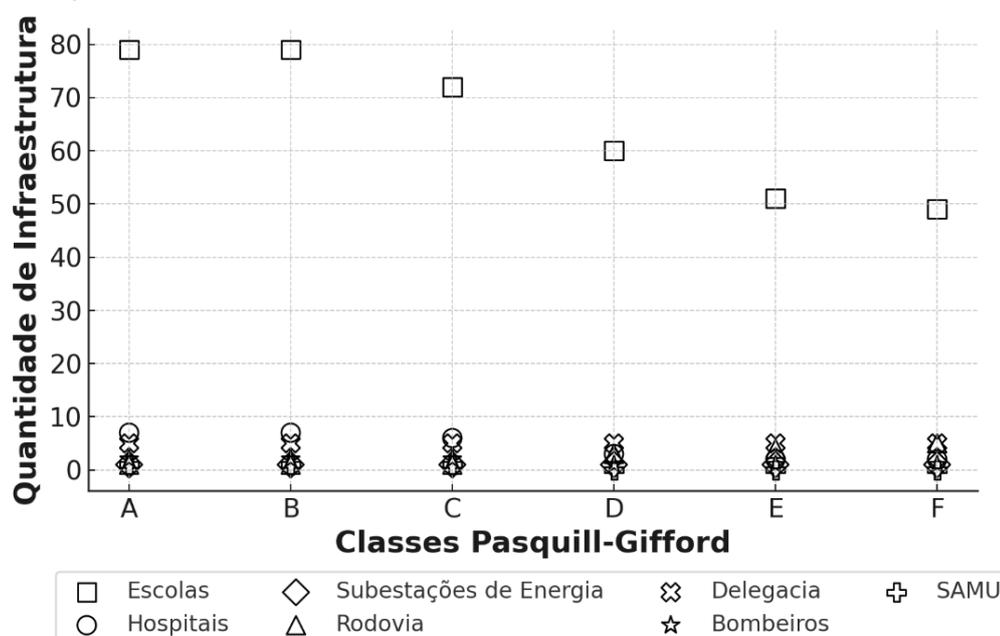
A análise da dispersão da pluma de 100 mSv demonstra um padrão semelhante ao observado nos cenários anteriores, com as escolas sendo as infraestruturas mais impactadas. Em condições de maior instabilidade atmosférica (classes A e B), foram afetadas 79 unidades escolares, enquanto em condições mais estáveis (classes E e F), esse número reduziu para 51 e 49, respectivamente. Esse comportamento reforça a tendência de que a instabilidade atmosférica amplia a dispersão inicial, enquanto a estabilidade reduz a área afetada, mas pode concentrar a radiação em determinadas regiões. Os hospitais, por sua vez, apresentam uma redução gradual do impacto, indo

de sete unidades afetadas nas classes A e B para apenas duas unidades nas classes E e F, indicando que sua localização é menos influenciada pela dispersão da pluma.

Infraestruturas como subestações de energia e rodovias mantiveram um impacto relativamente uniforme ao longo das diferentes classes de estabilidade atmosférica, sugerindo que sua exposição é menos sensível às condições atmosféricas. Já as delegacias registraram um número fixo de cinco unidades afetadas em todas as classes, reforçando a hipótese de que essas infraestruturas possuem uma distribuição homogênea em relação às áreas de impacto da pluma. O impacto sobre os bombeiros e o SAMU apresentou leve redução nas classes mais estáveis, caindo de duas unidades impactadas nas classes A e B para apenas uma unidade nas classes E e F, indicando uma menor exposição em cenários de maior estabilidade atmosférica.

A Figura 12 apresenta os resultados da pluma de 100 mSv, destacando a predominância do impacto sobre escolas e a redução progressiva das infraestruturas afetadas em condições de maior estabilidade atmosférica. Esses achados evidenciam a importância de um planejamento estratégico para mitigar os impactos radiológicos sobre infraestruturas essenciais, garantindo a continuidade dos serviços essenciais em cenários de dispersão radioativa.

Figura 12 - Impacto da Pluma 100 mSv



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

## 4.2 Discussão Comparativa dos Resultados

A análise comparativa dos três cenários destaca a influência crítica das condições atmosféricas na dispersão de material radioativo e no impacto sobre infraestruturas urbanas. Os resultados evidenciam que infraestruturas como escolas e hospitais são consistentemente as mais vulneráveis, independentemente da severidade da pluma, especialmente sob condições instáveis (classes A e B).

Especificamente, a pluma de  $7,00E-01$  Sv apresenta a maior variabilidade de impacto conforme a classe de estabilidade atmosférica, com maior concentração em C e D. A pluma de  $1,00E-01$  Sv, apesar de menor severidade, ainda causa impactos expressivos, especialmente sob condições de instabilidade atmosférica. Já a pluma de 50 mSv apresenta um padrão de impacto mais uniforme, mas ainda relevante para as infraestruturas mais sensíveis. Esses resultados reforçam a necessidade de respostas emergenciais robustas em cenários de maior instabilidade atmosférica, garantindo estratégias de mitigação que considerem a variabilidade dos impactos conforme as condições atmosféricas.

## 4.3 Resultados dos Cálculos dos Indicadores de Risco e Vulnerabilidade

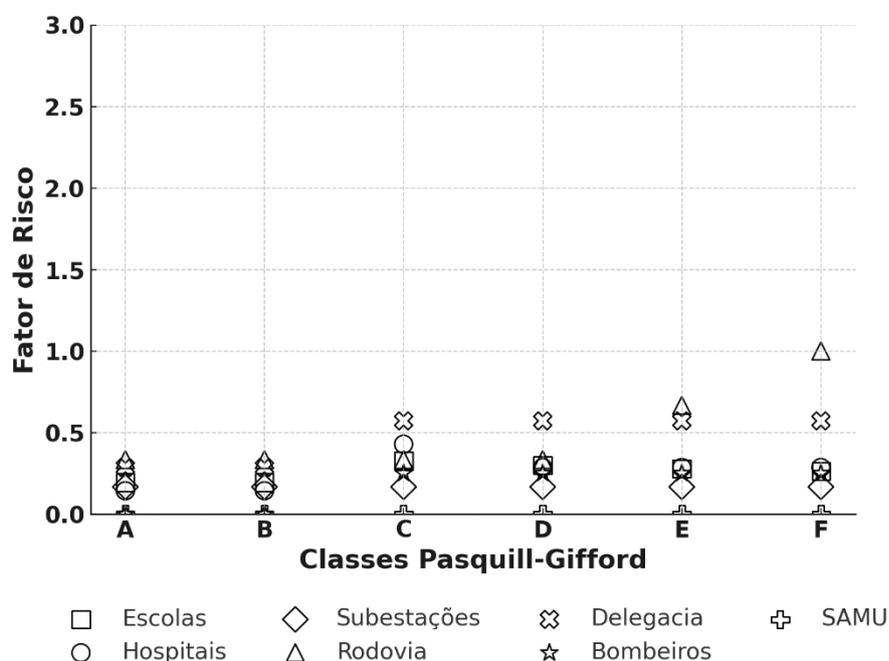
Os cálculos dos indicadores de risco e vulnerabilidade foram fundamentais para avaliar o impacto das plumas radiológicas sobre as infraestruturas críticas urbanas. A análise compreendeu o Fator de Risco (RF), o Fator de Impacto Total (FIT), o Índice de Vulnerabilidade (IV), o Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) e a Mediana dos Fatores de Risco (MFR). Estes indicadores permitiram quantificar e caracterizar a exposição ao risco radiológico em função das condições atmosféricas e das diferentes infraestruturas urbanas analisadas.

### 4.3.1 Fator de Risco (RF)

A análise do Fator de Risco (RF) tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade das infraestruturas críticas expostas à dispersão radiológica, considerando a influência das classes Pasquill-Gifford (PG) na propagação do material radioativo. O RF representa a fração de infraestruturas impactadas dentro da zona de

contaminação, permitindo uma avaliação comparativa entre os diferentes cenários simulados. Os resultados indicam que escolas e hospitais são as infraestruturas mais afetadas nos três cenários analisados, sendo mais sensíveis às condições atmosféricas instáveis, onde a dispersão do material ocorre de maneira mais ampla. A Figura 13 apresenta os valores do RF no cenário de maior severidade, correspondente à pluma de 700 mSv, evidenciando que as escolas apresentam os maiores níveis de risco, especialmente nas classes C e D, enquanto rodovias e delegacias ganham relevância em classes mais estáveis, como E e F.

**Figura 13**— Fator de Risco Pluma 700 mSv

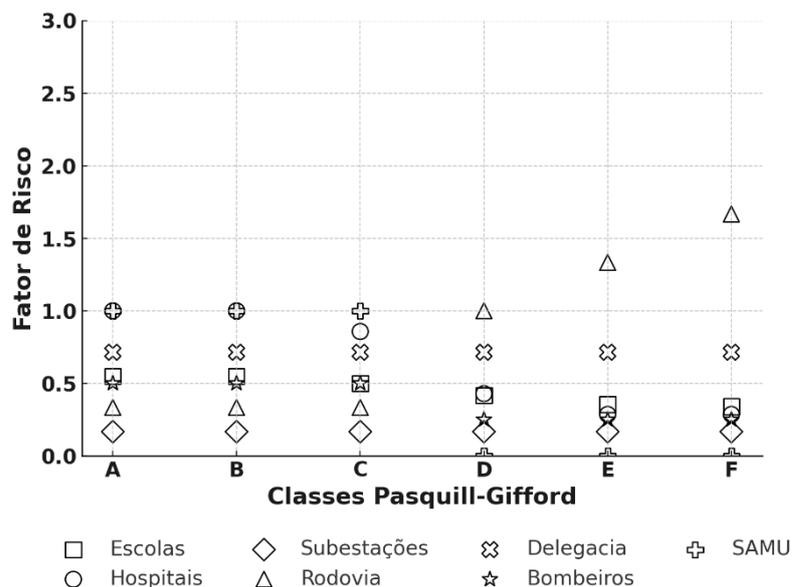


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No cenário intermediário, referente à pluma de 100 mSv, os resultados demonstram um aumento expressivo do RF para hospitais nas classes A e B, indicando sua alta vulnerabilidade sob condições atmosféricas instáveis. Além disso, observa-se que rodovias e subestações mantêm valores relativamente constantes, sugerindo que seu risco não sofre grandes variações conforme as condições de estabilidade atmosférica mudam. À medida que se avança para classes mais estáveis (E e F), nota-se uma redistribuição do risco, com um aumento na exposição das delegacias, o que pode estar associado à concentração da pluma radiológica nessas

condições. A Figura 14 apresenta os valores obtidos para esse cenário, destacando a variação dos fatores de risco em função da estabilidade atmosférica.

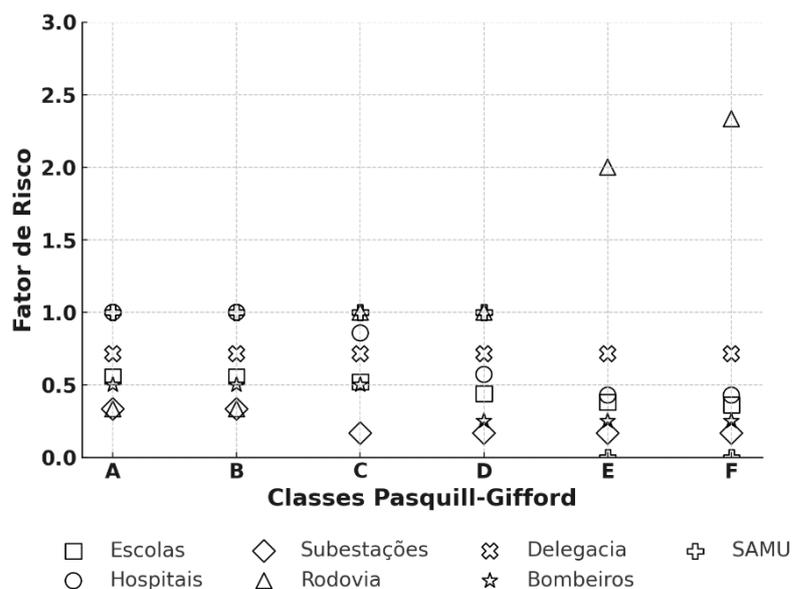
**Figura 14**— Fator de Risco Pluma 100 mSv



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No cenário de menor severidade, com pluma de 50 mSv, verifica-se uma redução nos valores absolutos de RF, mas a distribuição de risco segue um padrão semelhante aos cenários anteriores. Escolas e hospitais permanecem como as infraestruturas mais vulneráveis, enquanto rodovias e delegacias apresentam um aumento gradual do RF em atmosferas mais estáveis. Isso sugere que, embora a intensidade da radiação seja menor, a dispersão do material pode se tornar mais localizada, afetando de forma mais concentrada algumas infraestruturas específicas. A Figura 15 apresenta os valores do RF para esse cenário, permitindo uma visualização clara da evolução do risco conforme as condições atmosféricas variam.

**Figura 15—** Fator de Risco Pluma 50 mSv



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

#### 4.3.2 Fator de Impacto Total (FIT)

O Fator de Impacto Total (FIT) tem como principal objetivo quantificar o impacto cumulativo das plumas radiológicas sobre as infraestruturas críticas urbanas, considerando diferentes cenários de dispersão e estabilidade atmosférica. Esse indicador permite uma análise comparativa entre os diferentes níveis de severidade da pluma, fornecendo informações relevantes para o planejamento de mitigação de riscos em eventos radiológicos.

No cenário de maior severidade (700 mSv), os valores de FIT são relativamente baixos nas classes A e B, indicando que as condições atmosféricas mais instáveis favorecem a dispersão do material radioativo, reduzindo a concentração em áreas urbanas específicas. Entretanto, à medida que a estabilidade atmosférica aumenta (classes C a F), observa-se um crescimento progressivo no FIT, refletindo uma maior concentração da pluma e, conseqüentemente, um impacto mais pronunciado sobre as infraestruturas críticas. Esse comportamento destaca a necessidade de estratégias específicas para mitigação em condições atmosféricas estáveis, onde a dispersão é reduzida e a contaminação tende a se acumular em regiões urbanas.

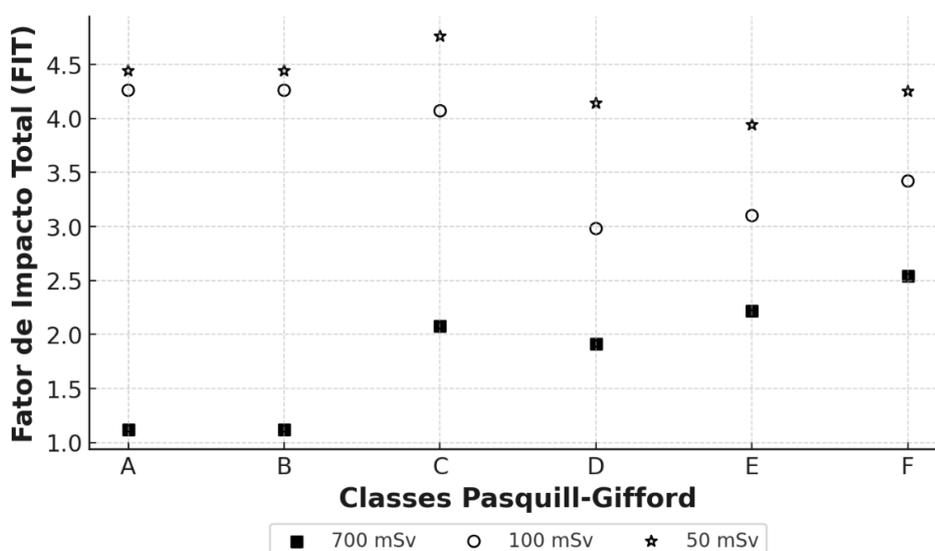
No cenário de severidade intermediária (100 mSv), o FIT apresenta um comportamento diferenciado, sendo mais elevado nas classes iniciais (A e B) e

atingindo um pico na classe C antes de apresentar uma leve redução nas classes subsequentes. Esse padrão sugere que, sob condições moderadamente instáveis, a pluma radiológica mantém uma alta concentração inicial antes de se dispersar gradualmente. Esse resultado indica que as infraestruturas críticas localizadas em áreas expostas à dispersão inicial da pluma podem enfrentar riscos elevados, especialmente em condições atmosféricas moderadamente instáveis, onde a dispersão é parcial, mas ainda significativa.

Já no cenário de menor severidade ( $5,00E-2$  Sv), os valores de FIT são os mais elevados entre os três cenários analisados. O impacto total das plumas radiológicas é particularmente elevado nas classes A e B, atingindo um pico na classe C antes de apresentar uma redução gradual até a classe F. Esse comportamento sugere que, mesmo em um cenário de menor carga radioativa, a dispersão inicial da pluma pode resultar em impactos significativos, principalmente quando ocorre em condições atmosféricas instáveis. A persistência de valores elevados de FIT nas classes iniciais demonstra que infraestruturas críticas situadas nessas regiões podem permanecer vulneráveis, mesmo diante de eventos radiológicos de menor magnitude.

A Figura 16 apresenta os valores calculados do Fator de Impacto Total (FIT) para os três cenários de dispersão radiológica, detalhando sua variação ao longo das diferentes classes de estabilidade atmosférica Pasquill-Gifford.

**Figura 16—** Fator de Impacto Total (FIT)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 4.3.3 Índice de Vulnerabilidade (IV)

O Índice de Vulnerabilidade (IV) mede o grau de susceptibilidade das infraestruturas críticas aos impactos de um evento radiológico, considerando diferentes condições atmosféricas e níveis de dispersão. A avaliação do IV permite compreender como a estabilidade atmosférica influencia a vulnerabilidade das infraestruturas e como essa vulnerabilidade varia em função da severidade da pluma radiológica. Esse indicador é essencial para o planejamento de estratégias de mitigação e resposta, pois possibilita identificar quais infraestruturas estão mais expostas a diferentes condições de dispersão atmosférica.

No cenário de maior severidade (700 mSv), os valores do IV são relativamente baixos para as classes atmosféricas mais instáveis (A e B), indicando que, sob essas condições, as infraestruturas críticas sofrem menos impacto devido à rápida dispersão do material radioativo. No entanto, conforme a estabilidade atmosférica aumenta (classes C, D e F), observa-se um crescimento progressivo no IV, sugerindo que a menor dispersão da pluma nessas condições resulta em uma concentração maior de radiação em áreas específicas, aumentando a vulnerabilidade das infraestruturas expostas. Esse padrão reforça a necessidade de medidas preventivas adicionais em cenários onde a estabilidade atmosférica é elevada.

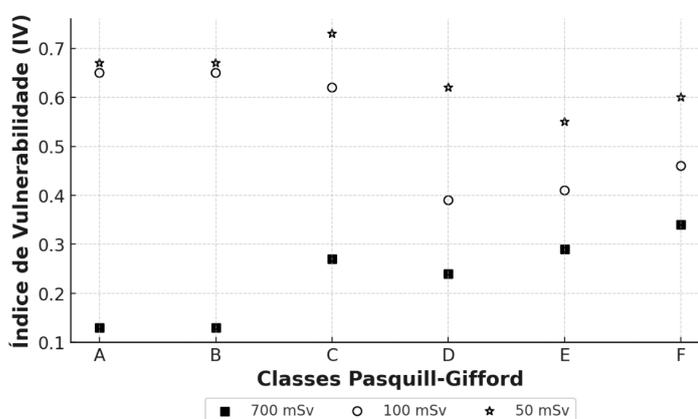
Para o cenário de severidade intermediária (100 mSv), o IV apresenta valores mais elevados nas classes A e B em comparação ao cenário de maior severidade, demonstrando que infraestruturas críticas localizadas em áreas sob influência de plumas moderadas são mais vulneráveis em condições atmosféricas instáveis. Esse comportamento pode estar relacionado à combinação entre uma dispersão inicial rápida e uma posterior concentração de material radioativo em áreas críticas. Além disso, o IV apresenta uma leve redução na classe D, seguida de um novo aumento nas classes E e F, o que sugere que a vulnerabilidade das infraestruturas críticas não é uniforme e depende tanto da dispersão inicial quanto da capacidade de retenção da pluma em atmosferas mais estáveis.

Já no cenário de menor severidade (50 mSv), os valores do IV se destacam por serem mais elevados, principalmente nas classes C e F. Isso indica que, mesmo em eventos de menor magnitude, as infraestruturas críticas podem sofrer impactos significativos quando a dispersão ocorre em atmosferas mais estáveis, resultando na concentração prolongada de material radioativo em áreas específicas. A elevação do

IV nessas condições reforça a necessidade de considerar a estabilidade atmosférica na definição de estratégias de mitigação, pois em cenários de menor dispersão, o risco de acúmulo local de radiação é maior.

A Figura 17 apresenta a variação do Índice de Vulnerabilidade (IV) para as diferentes classes de estabilidade atmosférica e níveis de severidade da pluma radiológica, destacando as infraestruturas mais expostas ao impacto radiológico em função das condições atmosféricas predominantes.

**Figura 17— Índice de Vulnerabilidade (IV)**



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

#### 4.3.4 Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR)

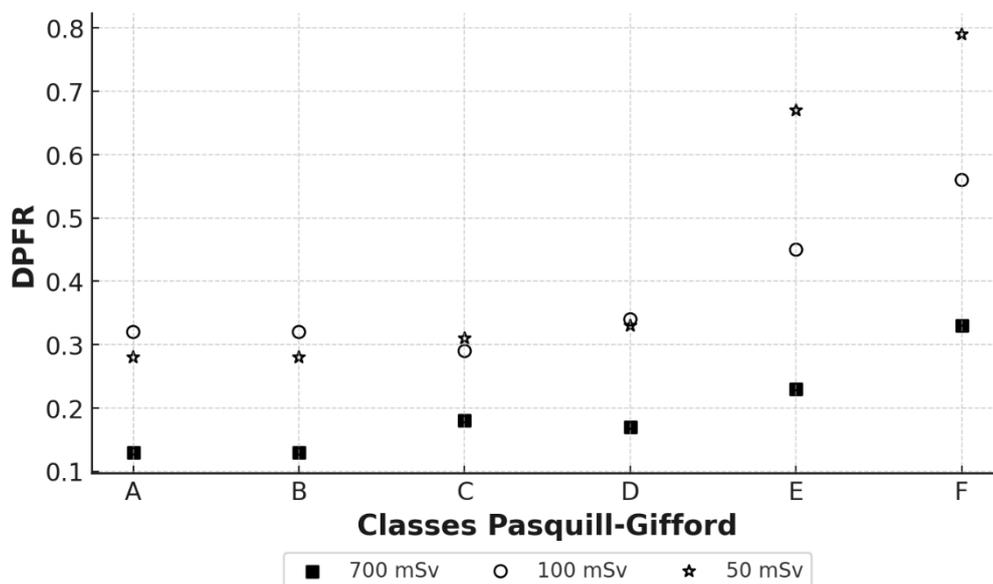
O Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) é um indicador estatístico que avalia a dispersão dos valores de risco em relação à média, permitindo identificar a variabilidade do impacto das plumas radiológicas sobre as infraestruturas críticas. Esse indicador é fundamental para compreender como as oscilações no risco são influenciadas pelas condições atmosféricas e pela severidade da dispersão radiológica. A análise do DPFR possibilita identificar quais cenários apresentam maior incerteza e, conseqüentemente, exigem medidas de mitigação mais rigorosas para minimizar as flutuações na exposição das infraestruturas.

No cenário de maior severidade (700 mSv), os valores do DPFR são relativamente baixos para as classes de estabilidade atmosférica A e B, indicando menor variabilidade do risco sob essas condições. Esse comportamento sugere que, em atmosferas mais instáveis, a dispersão do material radioativo ocorre de maneira mais homogênea, resultando em uma distribuição de risco mais uniforme entre as

infraestruturas. No entanto, à medida que a estabilidade atmosférica aumenta, observa-se um crescimento progressivo no DPFR, atingindo seu valor máximo na classe F. Isso demonstra que, em condições de maior estabilidade, o risco se torna mais variável, refletindo a influência da retenção prolongada da pluma radiológica em áreas específicas. Para o cenário de severidade intermediária (100 mSv), o DPFR apresenta um comportamento distinto, com valores mais elevados nas classes A e B, mantendo-se relativamente estáveis até a classe C e aumentando acentuadamente nas classes D e F. Esse padrão sugere que, nesse nível de severidade, as condições atmosféricas menos estáveis favorecem uma dispersão inicial mais uniforme, mas a concentração do material radioativo torna-se mais imprevisível em atmosferas moderadamente estáveis. A alta variabilidade observada nas classes D e F indica que, nessas condições, as infraestruturas críticas estão sujeitas a flutuações de risco mais pronunciadas, tornando o planejamento de resposta a emergências mais desafiador.

No cenário de menor severidade ( $5,00E-2$  Sv), os valores do DPFR são os mais elevados entre os três cenários analisados, especialmente nas classes E e F. Esse aumento significativo na variabilidade do risco reflete a sensibilidade das infraestruturas a pequenos desvios nas condições atmosféricas, tornando as flutuações de risco mais expressivas. A maior instabilidade nos valores de DPFR em atmosferas mais estáveis sugere que, mesmo em eventos de menor severidade radiológica, as oscilações no impacto da pluma podem ser substanciais, exigindo abordagens diferenciadas para mitigar os efeitos da dispersão.

A Figura 18 apresenta os valores do Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) para os três cenários de severidade da pluma radiológica, destacando a influência das condições atmosféricas na variabilidade do risco enfrentado pelas infraestruturas críticas.

**Figura 18—** Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

#### 4.3.5 Mediana dos Fatores de Risco (MFR)

A Mediana dos Fatores de Risco (MFR) é um indicador estatístico que fornece uma visão central da distribuição de risco das infraestruturas críticas expostas à dispersão radiológica. Diferente da média, a mediana permite identificar a tendência predominante dos valores de risco, minimizando a influência de valores extremos que possam distorcer a análise. A utilização da MFR é essencial para compreender a concentração de risco em diferentes classes atmosféricas e identificar quais condições apresentam maior ou menor variação na vulnerabilidade das infraestruturas.

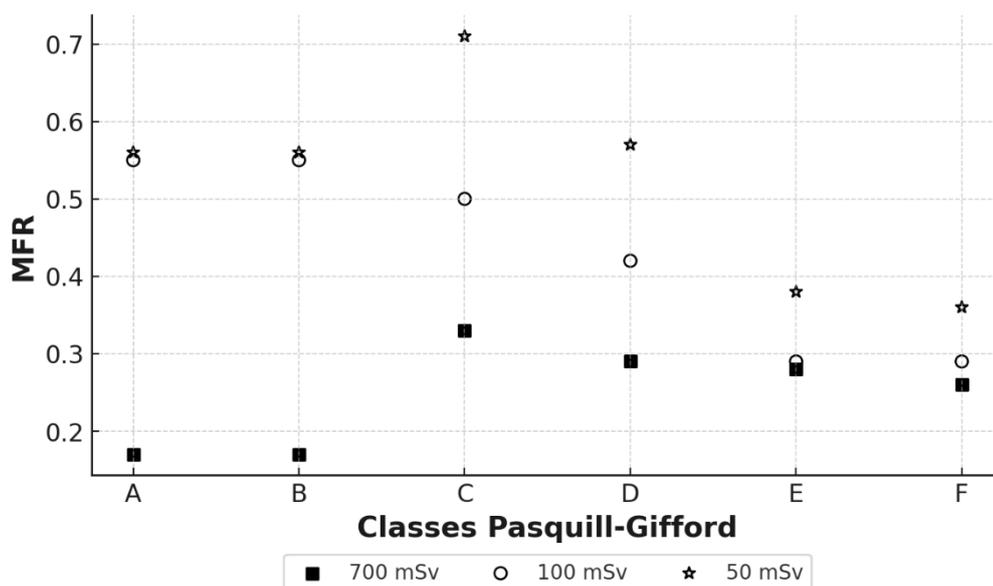
No cenário de maior severidade (700 mSv), os valores da MFR são relativamente baixos para as classes A e B, sugerindo que, sob essas condições de instabilidade atmosférica, a dispersão do material radiológico é mais uniforme e o risco não se concentra excessivamente em nenhuma infraestrutura específica. No entanto, um aumento acentuado na classe C indica que, em condições atmosféricas moderadamente instáveis, há uma concentração mais significativa de risco, possivelmente devido à dispersão menos eficiente e ao acúmulo de material radioativo em determinadas áreas urbanas. Após esse pico, os valores da MFR diminuem

gradualmente até a classe F, indicando que, conforme a estabilidade atmosférica aumenta, a dispersão se torna mais previsível e menos concentrada.

No cenário intermediário (100 mSv), os valores de MFR seguem um padrão semelhante, mas com diferenças notáveis. Observa-se que os valores permanecem elevados nas classes A e B, sugerindo que, nesse nível de severidade, o impacto sobre as infraestruturas críticas é maior mesmo em condições de instabilidade atmosférica. A partir da classe C, ocorre uma diminuição progressiva, o que indica que, à medida que a estabilidade atmosférica aumenta, a dispersão do material radioativo se torna mais homogênea, reduzindo a concentração de risco em áreas específicas. Esse comportamento sugere que, nesse cenário, a dispersão inicial do material radiológico pode ser mais agressiva, mas a estabilização subsequente contribui para a redução da vulnerabilidade acumulada.

No cenário de menor severidade (50 mSv), os valores de MFR são os mais elevados, especialmente na classe C, onde a mediana do risco atinge seu pico. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que, em eventos de menor severidade radiológica, a dispersão atmosférica é menos intensa, permitindo o acúmulo localizado de material radioativo em pontos específicos. Após esse pico, a MFR apresenta uma queda acentuada nas classes D, E e F, indicando que, à medida que a estabilidade atmosférica aumenta, a distribuição do risco se torna mais uniforme, com menor concentração de impacto sobre as infraestruturas críticas.

A Figura 11 apresenta a distribuição dos valores da Mediana dos Fatores de Risco (MFR) para os três cenários de severidade analisados, destacando as diferenças na concentração de risco ao longo das classes de estabilidade atmosférica e evidenciando os padrões observados nos diferentes níveis de dispersão radiológica.

**Figura 19—** Mediana dos Fatores de Risco (MFR)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

#### 4.4 Análise da Pluma de 700 mSv nas Classes de Pasquill-Gifford

A pluma de 700 mSv foi selecionada para esta análise devido à sua correlação direta com a Síndrome Aguda da Radiação (SAR). Esse nível de dose representa um risco significativo à saúde humana, tornando-se relevante para a compreensão da dispersão dos radionuclídeos em diferentes condições atmosféricas. Para avaliar o comportamento da pluma, foi realizada uma análise comparativa dentro das seis classes de estabilidade Pasquill-Gifford (PG), utilizando a infraestrutura de escolas como referência, devido à sua predominância em número conforme apresentado na tabela 5 onde mostra quantas escolas foram atingidas em cada classe de Pasquill-Gifford (PG).

**Tabela 5—** Número de Escolas Impactadas pela Pluma de 700 mSv em Diferentes Classes Pasquill-Gifford

Pasquill-Gifford (PG) class	ESCOLAS
A	28
B	28
C	47

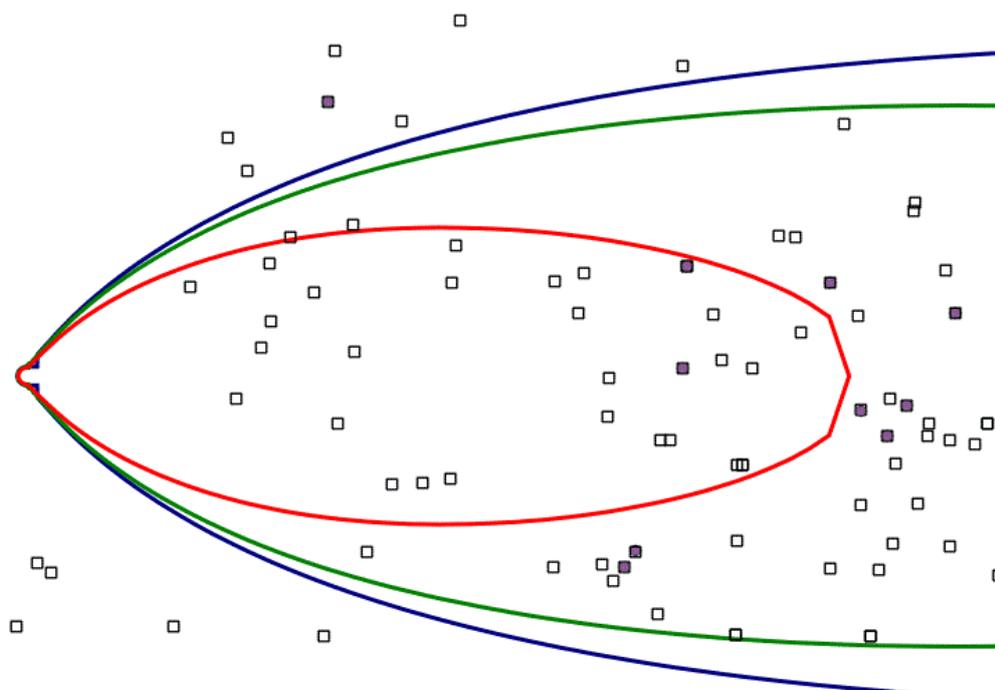
D	43
E	40
F	38

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As figuras apresentadas nesta seção foram geradas por meio do software QGIS e representam a projeção da pluma sobre um conjunto de pontos que indicam a localização das escolas. O esquema base foi intencionalmente ocultado para preservar a origem da dispersão. Sobre esse esquema, foram sobrepostas as plumas geradas para cada classe de Pasquill-Gifford, permitindo a identificação das escolas que ficaram dentro da área de influência da pluma. Sempre que a pluma (representada pela linha vermelha) interceptou um dos pontos que marcam a posição de uma escola, essa escola foi computada como afetada dentro da respectiva classe atmosférica.

Na classe A, que representa uma atmosfera altamente instável, observa-se uma dispersão ampla e difusa da pluma, favorecendo a diluição dos contaminantes no ambiente. A Figura 19 ilustra esse comportamento, evidenciando que a pluma se expande rapidamente e cobre uma grande quantidade de escolas.

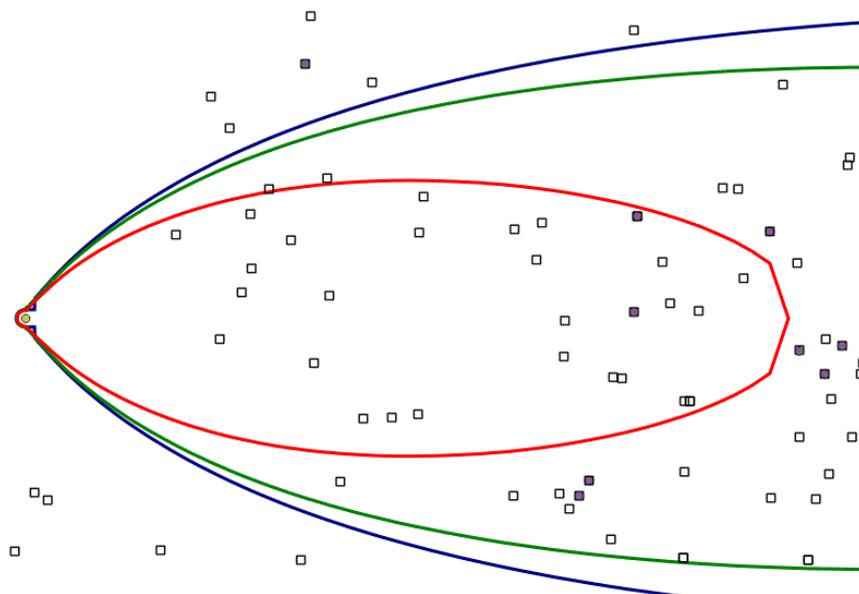
**Figura 20**— Pluma de 700 mSv na classe A



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

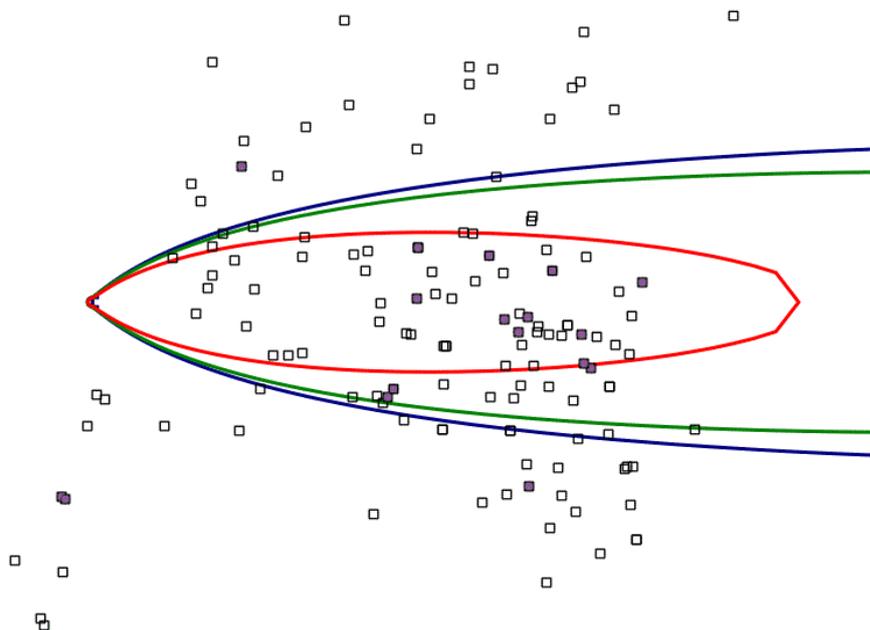
A classe B mantém um padrão semelhante ao da classe A, com uma dispersão ainda significativa, mas ligeiramente mais concentrada. A Figura 20 demonstra que, apesar da pluma continuar extensa, há uma leve redução na área afetada, resultando em uma pequena diminuição no número de escolas dentro da zona de influência.

**Figura 21**— Pluma de 700 mSv na classe B



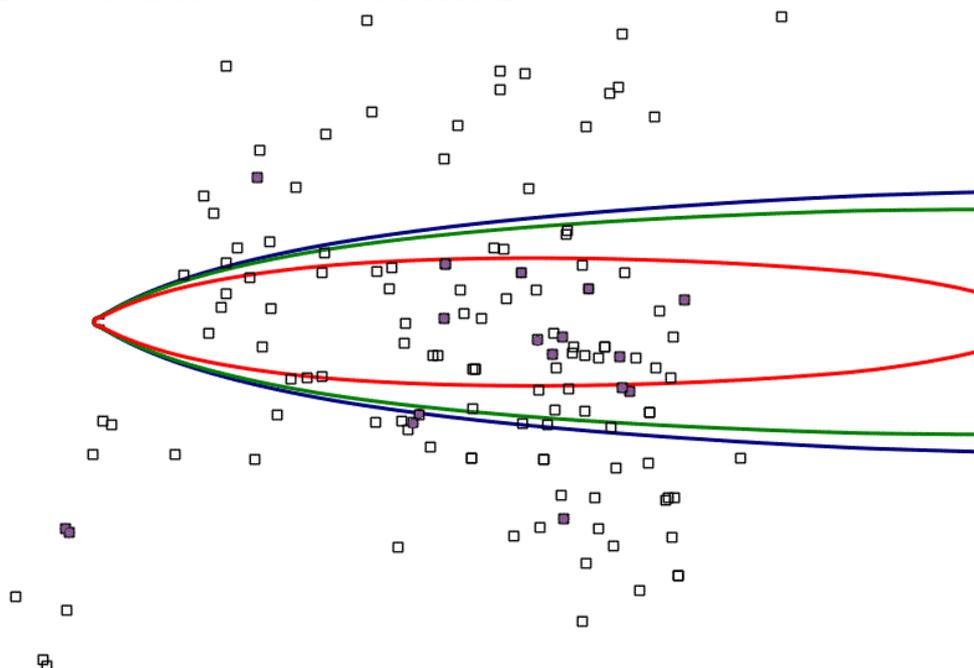
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na classe C, que representa condições de estabilidade moderada, verifica-se uma concentração maior da pluma. A Figura 21 indica que a dispersão ocorre de maneira mais direcionada e delimitada, resultando em um menor número de escolas dentro da área afetada.

**Figura 22—** Pluma de 700 mSv na classe C

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

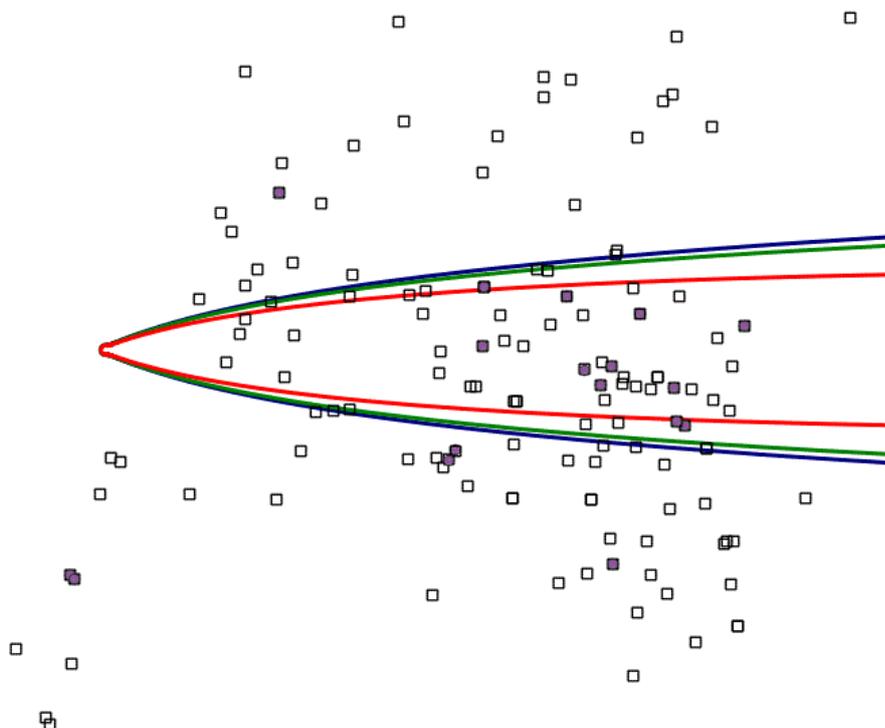
A classe D, caracterizada por uma atmosfera neutra, apresenta um formato intermediário de dispersão. Conforme observado na Figura 22, a pluma mantém uma extensão considerável, porém com maior concentração em uma área específica, o que influencia diretamente a quantidade de escolas impactadas.

**Figura 23—** Pluma de 700 mSv na classe D

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na classe E, correspondente a uma atmosfera ligeiramente estável, a dispersão da pluma se torna ainda mais concentrada. A Figura 23 revela que a pluma atinge uma área reduzida, com um menor número de escolas sendo afetadas.

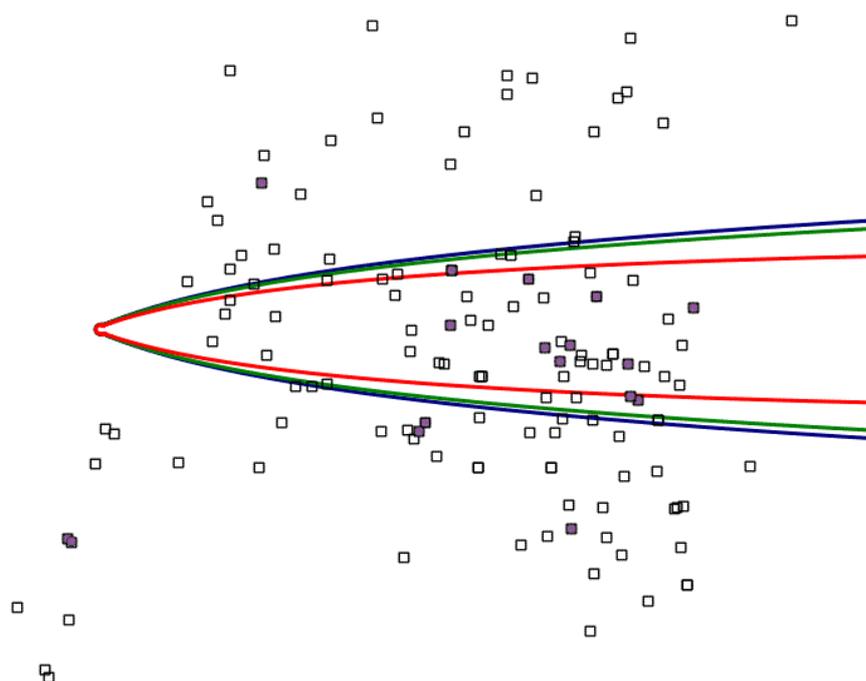
**Figura 24**— Pluma de 700 mSv na classe E



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Por fim, na classe F, que representa uma atmosfera altamente estável, a pluma se mantém bastante compacta e concentrada, com menor dispersão lateral. A Figura 24 demonstra que, embora a pluma alcance menor extensão, as escolas que estão dentro dessa zona sofrem maior impacto devido à retenção dos contaminantes.

**Figura 25**— Pluma de 700 mSv na classe F



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Essa análise evidencia a influência das condições atmosféricas na dispersão do material radioativo e na área de impacto sobre a infraestrutura urbana. O uso do QGIS permitiu uma avaliação espacial detalhada, demonstrando como a variação das classes de Pasquill-Gifford modifica a abrangência da pluma e a quantidade de escolas potencialmente afetadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a relevância da modelagem computacional para a análise dos impactos de eventos radiológicos em infraestruturas críticas urbanas, considerando a influência das condições atmosféricas na dispersão de material radioativo. A aplicação combinada das ferramentas HotSpot Health Physics Codes v3.1.2 e QGIS possibilitou a identificação e o mapeamento das áreas mais vulneráveis, fornecendo subsídios técnicos para a formulação de estratégias de mitigação e resposta emergencial.

Os resultados indicaram que a severidade do impacto radiológico não depende exclusivamente da intensidade da liberação de material radioativo, mas também das condições de estabilidade atmosférica no momento do evento. Infraestruturas críticas, como hospitais, escolas, rodovias e subestações de energia, foram as mais afetadas, sendo essencial o desenvolvimento de protocolos específicos para minimizar sua vulnerabilidade.

Os cálculos dos indicadores de risco e vulnerabilidade — Fator de Risco (RF), Fator de Impacto Total (FIT), Índice de Vulnerabilidade (IV), Desvio Padrão dos Fatores de Risco (DPFR) e Mediana dos Fatores de Risco (MFR) — demonstraram que cenários de maior estabilidade atmosférica concentram mais material radioativo em áreas específicas, aumentando a exposição das infraestruturas críticas. Por outro lado, condições instáveis favorecem uma dispersão mais ampla da pluma radioativa, reduzindo a concentração localizada, mas ampliando a área potencialmente contaminada.

O estudo revelou que estratégias convencionais de resposta podem ser modeladas para determinados cenários, especialmente quando a pluma radiológica afeta simultaneamente múltiplos setores urbanos. O desenvolvimento de planos de evacuação, protocolos de descontaminação e integração entre órgãos de resposta emergencial é fundamental para reduzir os impactos humanos e estruturais.

Como limitação do estudo, destaca-se a abordagem simplificada adotada na modelagem, que considerou apenas a dispersão atmosférica sem incluir a influência de fatores urbanos, como edificações, barreiras naturais e fluxos de ventilação. Estudos futuros podem aprofundar a análise com técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e integrar dados geoespaciais de infraestrutura real para aumentar a precisão das previsões.

Dessa forma, os achados desta pesquisa reforçam a importância da resiliência urbana na mitigação dos efeitos de eventos radiológicos, contribuindo para a formulação de diretrizes de segurança baseadas em modelagem computacional avançada. A aplicação desses conceitos poderá aprimorar a capacidade de resposta das cidades brasileiras, garantindo maior proteção à população e às infraestruturas críticas diante de possíveis cenários de contaminação radiológica.

### 5.1 Contribuições e limitações

Apesar das limitações mencionadas, este estudo oferece uma estrutura conceitual e metodológica robusta para a avaliação inicial de riscos em cenários de emergência radiológica. Uma das principais dificuldades enfrentadas foi a **ausência de dados consolidados e padronizados sobre a importância relativa das diferentes infraestruturas críticas urbanas**. Não foram identificadas diretrizes técnicas ou bases estatísticas oficiais que atribuíssem pesos ou coeficientes de vulnerabilidade específicos para hospitais, escolas, rodovias, subestações ou outros elementos essenciais. Essa limitação exigiu decisões baseadas em julgamento técnico, cuja justificativa é apresentada em seção específica deste trabalho, e pode influenciar a comparabilidade dos resultados com estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, D. **Principles of Emergency Planning and Management**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2002.

ALVES, F. R. *et al.* Modelagem computacional na estimativa dos impactos radiológicos urbanos. **Revista Brasileira de Física Aplicada**, v. 10, n. 2, p. 23-35, 2019.

ANDRADE, E. R. de; BAUERMANN, L. de F. **Introdução à radiobiologia: conexões bioquímicas e biomoleculares**. Santa Maria, RS: Ed. UFSM, 2010.

ANDRADE, E. R. *et al.* Estudo dos impactos da dispersão radiológica em áreas urbanas: um enfoque na resiliência de infraestruturas críticas. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 18, n. 1, p. 55-72, 2022a.

ANDRADE, E. R. *et al.* Evaluating urban resilience in a disruptive radioactive event. **Progress in Nuclear Energy**, v. 147, p. 04218, 2022b.

ANDRADE, E. R. de. **Metodologia para avaliação da resiliência e suporte à decisão em ambiente radioativo urbano simulado**. 2021. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2021.

ANDRADE, E. R. *et al.* Urban critical infrastructure disruption after a radiological dispersive device event. **J Environ Radioact**, v. 222, p. 106358, 2020.

ATTIX, F. H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. New York: Wiley-VCH, 2007.

BAGGETT, R. K.; STOUT, A. L. Critical infrastructure risk analysis and management. *In*: MASYS, A. J. (ed.). **Handbook of Security Science**. 1. ed. Cham: Springer, 2022. p. 1–19.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Diretrizes para Atendimento em Emergências Radiológicas**. Brasília: MS, 2020.

BRENNEER, D. J. *et al.* The linear no-threshold model and radiation protection. **Health Physics**, v. 85, n. 5, p. 139-152, 2003.

CHEN, L. *et al.* Infrastructure risk assessment in emergency planning. **Urban Safety Journal**, v. 15, n. 3, p. 255-270, 2001.

CISA. Cybersecurity & Infrastructure Security Agency. **Critical Infrastructure Sectors**. CISA, 2019. Disponível em: <https://www.cisa.gov/critical-infrastructure-sectors>. Acesso em: 10 jan. 2019.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição Regulatória 3.01/002**. Brasília: CNEN, 2011.

DOE. Department of Energy. **HotSpot Health Physics Codes Manual**. Washington, DC: U.S. DOE, 2003.

DE BRUIJNE, M.; VAN EETEN, M. Resilience: Exploring the concept and its meanings. **Safety Science**, v. 4, n. 4, p. 112-123, 2007.

FAIRUZ, S.; SAHADATH, M. Total Effective Dose Equivalent (TEDE) and its application in radiation protection. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 180, p. 109-120, 2020.

FLORIG, K.; FISCHHOFF, B. Public perceptions of nuclear risk. **Risk Analysis Journal**, v. 12, n. 2, p. 355-368, 2007.

FURUTA, T.; TAKAHASHI, F. Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 52, n. 6, p. 897-904, 2015.

GERI, M. *et al.* QGIS: A GIS software for urban risk analysis. **Geospatial Technologies Journal**, v. 11, n. 1, p. 15-25, 2017.

GREENBERG, M. **Urban Disaster Resilience: The Role of Infrastructure Planning**. 1. ed. Washington, DC: U.S. Institute of Urban Studies, 2019.

GUIDOTTI, T. *et al.* Strategies for enhancing urban resilience against radiological threats. **Urban Planning Review**, v. 9, n. 3, p. 88-110, 2016.

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

HANNA, S. R.; BRIGGS, G. A.; HOSKER, R. P. **Handbook on Atmospheric Diffusion**. Oak Ridge, TN: U.S. Department of Energy, 1982.

HEILBRON, P. F. L. Breve histórico sobre a proteção radiológica Paulo Heilbron. *In: Encontro da Academia Brasileira de Medicina*, set. 2017. **Anais [...]**. São Paulo, 2017.

HOMANN, S. G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide**. CA, USA.: Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA, 2014.

HOMANN, S. G. **HotSpot Health Physics Codes v3.1.2: User's Guide**. CA, USA.: Lawrence Livermore National Laboratory, 2019.

HOMANN, S. G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.1.2 User's Guide**. CA, USA.: Lawrence Livermore National Laboratory, 2020.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **The Radiological Accident in Goiânia**. Vienna: IAEA, 1988.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Assessment of Radiation Risks in Urban Areas**. Vienna: IAEA, 1996.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Environmental Consequences of the Chernobyl Accident**. Vienna: IAEA, 2020.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation**: Beir V. Washington, DC: IAEA, 1990.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP, Publication 103. Oxford: Elsevier, 2007.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil**. [s.d.]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 12 fev. 2025.

KAMBOJ, S. *et al.* Modeling of the EMRAS urban working group hypothetical scenario using the RESRAD-RDD methodology. **J Environ Radioact**, v. 100, n. 12, p. 1012-1018, dez. 2009.

KARAM, P. Radiological Terrorism. **Human and Ecological Risk Assessment - Hum Ecol Risk Assessment**, v. 11, 06 jan. 2005.

KIM, Y.; KIM, M.; KIM, W. Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy. **Energy Policy**, v. 61, n. 1, p. 78–95, 2013.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. Nova Jersey: Wiley, 2000.

KRISTENSEN, H. M.; KORDA, M. Tactical nuclear weapons, 2019. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 75, n. 5, p. 252-261, 2019.

LEE, S. D. *et al.* Radiological dispersal device outdoor simulation test: Cesium chloride particle characteristics. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1, p. 56-63, 2010.

MACHADO, R. V. *et al.* Impact of urban shielding on radiological risk after a hypothetical nuclear event. **Nuclear Engineering and Design**, 2024.

NAVARRO, M. V. T. *et al.* **Controle de riscos à saúde em radiodiagnóstico: uma perspectiva histórica**. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, Fundação Oswaldo Cruz, v. 15, n. 4, p. 1039-1047, 2008.

NEVES, S. C. T. *et al.* Lost life expectancy following a hypothetical urban radiological incident. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 273, n. 1, p. 3-10, 2024.

NRC. National Research Council. **Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation**: BEIR VII. Washington, DC: The National Academies Press, 2006.

PANTELI, M.; MANCARELLA, P. The Grid: Stronger, Bigger, Smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience. **IEEE Power & Energy Magazine**, v. 13, n. 3, p. 58–66, 2015. Doi: 10.1109/MPE.2015.2397334.

PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. **Meteorological Magazine**, v. 90, p. 33-491, 1961.

QGIS. Quantum Geographic Information System. **User Manual**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 10 jan. 2025.

RINALDI, S. *et al.* Modeling interdependencies in critical infrastructures. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 8, n. 1, p. 43-55, 2001.

SACHS, R. K.; HLATKY, L. R. Dose-rate dependent stochastic effects in radiation cell-survival models. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 29, n. 3, p. 169-184, 1990.

SAENKO, V. *et al.* The Chernobyl accident and its consequences. **Clin Oncol (R Coll Radiol)**, v. 23, n. 4, p. 234-243, mai. 2011. Doi: 10.1016/j.clon.2011.01.502.

SILVA, J. P. *et al.* Aplicação de modelos computacionais na análise de impacto radiológico. **Revista de Segurança Nuclear**, v. 21, n. 3, p. 75-92, 2015.

THAUL, S. O. M. H. **Potential Radiation Exposure in Military Operations: Protecting the Soldier Before, During, and After**. Washington, DC: National Academies Press (US), 1999.

UNESCO. Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura. **Disaster Risk Reduction in Schools: Guidelines for Policymakers**. Paris: UNESCO, 2017.

U.S. NRC. Nuclear Regulatory Commission. **Nuclear Emergency Preparedness Guide**. Washington, DC: U.S. NRC, 2010.

VENKATRAM, A. An examination of the Pasquill-Gifford-Turner dispersion scheme. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 8, p. 1283-1290, 1996.

WHO. World Health Organization. **Guidelines for Radiation Emergency Preparedness and Response**. Geneva: WHO, 2011.