

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

KARLA PEREIRA CARNEIRO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE RISCO RADIOLÓGICO E RADIOEPIDEMIOLÓGICO EM
CENTROS URBANOS: SIMULAÇÃO DE UM INCIDENTE NUCLEAR
HIPOTÉTICO EM UMA CIDADE LITORÂNEA**

**SÃO CRISTÓVÃO - SE
2026**

KARLA PEREIRA CARNEIRO DA SILVA

AVALIAÇÃO DE RISCO RADIOLÓGICO E RADIOEPIDEMIOLÓGICO EM
CENTROS URBANOS: SIMULAÇÃO DE UM INCIDENTE NUCLEAR
HIPOTÉTICO EM UMA CIDADE LITORÂNEA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Física da Universidade Federal de Sergipe, como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Área de concentração: Física da Matéria Condensada

Linha de pesquisa: Física Médica

Orientador(es): Prof^ª. Dr^ª. Divanizia N. Souza,
Prof. Dr. Edson R. de Andrade,

São Cristóvão - SE

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
Programa de Pós-Graduação em Física

**“Avaliação de risco radiológico e radioepidemiológico em
centros urbanos: simulação de um incidente nuclear
hipotético em uma cidade litorânea”**

por

Karla Pereira Carneiro da Silva

Dissertação de mestrado **APROVADA** em sessão pública no dia vinte e nove de julho do ano dois mil e vinte e seis perante a banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof^a. Dr^a. Divanízia do Nascimento Souza
(DFI-UFS)

Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade
(IEAv/DCTA)

Prof. Dr. William de Souza Santos
(DFI-UFS)

Prof. Dr. Rodrigo Carneiro Curzio
(IDQRBN-IME)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho concretiza um sonho compartilhado, iniciado ainda criança, sem a ideia de quanto chão percorreria até aqui. Foram inúmeros incentivos: de meus pais, do meu namorado, da minha família como um todo, de ex-professores, amigos, empreendedores da minha cidade, médicos e oficiais que conhecem o meu esforço e minha paixão. Cada um deles conviveu com uma versão minha, que juntas, moldaram quem eu sou hoje. Essa trajetória foi árdua, como todos os que passam pela academia, sabem. Mas os frutos do conhecimento são imensuráveis. Reconhecer as dificuldades faz parte de uma vida grata. Em respeito a cada pessoa que participou desta história, dedico meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiríssimo lugar, agradeço a Deus e a Nossa Senhora pela força que me sustentou nesta caminhada. Inúmeras foram às vezes em que eu ajoelhei buscando um direcionamento, descanso e o aconchego de braços que me acolhessem na ausência física dos meus pais.

Agradeço imensamente aos meus pais por todos os esforços e por ver mais uma vez, abraçarem meu sonho de estudar longe de casa, mesmo a 795 km de distância. Obrigada por cada puxão de orelha quando o convívio pesou, por cada conversa que me devolvia o aconchego de casa, por toda a decisão e amor. Sem o incentivo de vocês, eu não teria chegado até aqui (e é só o começo).

Ao meu namorado, Alex, que surgiu no início do mestrado e tornou todo esse caminho muito mais leve e feliz. Alex, seu amor e apoio em cada escuta, corrida, viagem, incentivo e nos momentos de fé foram impressionantes. Agradeço também à sua família, que me acolheu com tanto carinho, obrigada por tanto.

Aos meus queridos do DFI, Rosa Elze, Paróquia, aos amigos e professores de forma geral, meu muito obrigada por tudo. Não irei mencioná-los, mas vocês sabem que fazem parte dessa história. Obrigada por todo o apoio, pelas horas de conversa e estudos, pelas orações, almoços, eventos e reencontros. A vida é muito mais feliz ao lado de vocês.

A minha eterna gratidão aos meus orientadores, que tiveram um papel fundamental nesta conquista. A Prof^a Divanizia, pela orientação paciente e divertida, pelas conversas e motivação, obrigada por me incentivar tanto. Ao Prof. Edson, por me acolher no grupo, pelas contribuições e empurrões, que mais funcionavam como incentivos, conversas e ainda mais pelas brincadeiras; você é um grande exemplo. Ao prof. Curzio, por todas as conversas, explicações e dúvidas, muitíssimo obrigada. A prof^a Raquel, pela atenção, dedicação em me auxiliar e bater cabeça junto comigo, por todas as conversas, reuniões e brincadeiras. Ao Prof. João Batista, obrigada por todas as explicações, solicitude e incentivo ao longo

da vida acadêmica. Agradeço também aos professores que compõem a banca examinadora pela gentileza, dedicação e ricas contribuições na leitura deste trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Sergipe, em especial ao meu grupo de pesquisa (MPMG), pelo primeiro contato com a síntese de materiais, pelas reuniões e boas conversas. Agradeço também à CAPES, pelo suporte financeiro essencial para a realização deste estudo.

À minha querida avó (*in memoriam*), Estelita Batista dos Santos, à minha tia Maria das Dores Batista (*in memoriam*) e à amiga da família, Maria do Socorro (*in memoriam*), exemplos de amor, cuidado e motivação. Não segui a carreira nas forças armadas como tanto dizia, mas continuo fazendo umas coisas interessantes, vocês sempre souberam disso. Carrego vocês eternamente em meu coração.

Embora encerre agora o ciclo do mestrado, sei que minha jornada está apenas começando. É o início de sonhos antigos e novos caminhos repletos de desafios. Olhando para o alto, tenho a clareza do motivo de cada renúncia, distância, paixão e dificuldade: é por algo maior do que eu, sonhado desde os meus 8 anos, reencontrado em 2019 e consolidado de 2023 até aqui.

*“Se tens de servir a Deus com tua inteligência,
para ti estudar é uma obrigação grave.”
(São Josemaria Escrivá, Caminho, 336)*

RESUMO

Os acidentes nucleares liberam grandes quantidades de materiais radioativos para a atmosfera, expondo a população a doses de radiação ionizante e contaminação radioativa. Diante a ameaças de eventos radiológicos acidentais e/ou intencionais, é essencial empregar ferramentas que auxiliem na tomada de decisão para a análise de risco e a proteção da população ocupacionalmente exposta. Este estudo apresenta uma avaliação aprofundada dos efeitos de um incidente nuclear hipotético envolvendo um reator LWR instalado na cidade de Aracaju, considerando a população e a área impactada. A análise do evento baseia-se na classificação da estabilidade atmosférica segundo Pasquill-Gifford (classes PG) no momento do evento, na direção do vento predominante e nos dados censitários dos indivíduos. As simulações foram realizadas por meio do software *HotSpot Health Physics Code* v 3.1.2 para determinar a Dose Efetiva Total Equivalente (TEDE) e o Excesso de Risco Relativo (ERR) associado ao câncer radioinduzido, como a leucemia. As estimativas consideraram os modelos radioepidemiológicos de baixas doses, Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante (BEIR) V e VII, e critérios de vulnerabilidade, como idade e sexo, analisando grupos de pessoas do sexo masculino, feminino, crianças e idosos nas zonas afetadas. Para coletar os dados populacionais, foram usados Sistemas de Informação Geográfica (GIS) para delimitar zonas e grupos impactados e informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para avaliar a predominância dos ventos. Os resultados indicaram variações entre exposição e risco, atribuídas às classes atmosféricas locais e à direção dos ventos, majoritariamente a Leste-Sudeste (ESE) e Sudeste (SE). A expansão das isodoses se explica pelo relevo plano e rugoso da capital, combinado às Classes PG e ao direcionamento dos ventos. O estudo ressalta a importância de modelos geoespaciais na análise demográfica, na análise de dados censitários e na tomada de decisões conservadoras sobre a população exposta.

Palavras-chave: Modelagem de Risco Radiológico; Dispersão Atmosférica; Dados Censitários; Planta Nuclear; Simulação Computacional.

ABSTRACT

Nuclear accidents release large quantities of radioactive materials into the atmosphere, exposing the population to radiation doses and contamination. Given the threat of accidental and/or intentional radiological events, it is essential to employ tools that aid in decision-making for risk analysis and the protection of the occupationally exposed population. This study presents an in-depth assessment of the effects of a hypothetical nuclear incident involving an LWR reactor in the city of Aracaju, accounting for the population and affected area. The analysis of the event is based on the Pasquill-Gifford classification of atmospheric stability (PG Classes) at the time, the prevailing wind direction, and census data on the individuals. Simulations were performed using the HotSpot Health Physics Code v3.1.2 software to determine the Total Equivalent Effective Dose (TEDE) and the Excess Relative Risk (ERR) associated with radiation-induced cancers, such as leukemia. The estimates considered low-dose radioepidemiological models, Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) V and VII, and vulnerability criteria such as age and sex, analyzing groups of males, females, children, and the elderly in the affected areas. To collect population data, Geographic Information Systems (GIS) were used to delineate impacted zones and groups, and information from the National Institute of Meteorology (INMET) was used to assess wind patterns. The results indicated variations between exposure and risk, attributed to local atmospheric conditions and wind direction, predominantly from the East-Southeast (ESE) and Southeast (SE). The expansion of isodoses is explained by the capital's flat and rugged terrain, combined with PG classes and wind direction. The study highlights the importance of geospatial models for demographic analysis, census data, and informed decisions about the exposed population.

Keywords: radiological risk modeling; atmospheric dispersion; census data; nuclear power plant; computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa cartográfico (político) da região estudada	22
Figura 2 – Mecanismos envolvidos na liberação e no transporte de aerossóis radioativos na atmosfera	30
Figura 3 – Esboço esquemático da pluma radioativa proveniente de um acidente nuclear com contaminação ambiental	31
Figura 4 – Trato respiratório	39
Figura 5 – Modelo de reator NuScale e processo de conversão de energias	46
Figura 6 – Mapa de isodoses sobre o cenário instável e ligeiramente estável de recorte da região metropolitana de Aracaju	47
Figura 7 – Janela inicial do HotSpot	54
Figura 8 – Janela do termo fonte no código HotSpot	55
Figura 9 – Janela da meteorologia visualizada no código	56
Figura 10 – Janela dos receptores	57
Figura 11 – Janela de setup geral visualizada no HotSpot	58
Figura 12 – Janela do output no código HotSpot	58
Figura 13 – Biblioteca de radionuclídeos visualizada no HotSpot após a seleção do radionuclídeo Cs-137	60
Figura 14 – Curvas sobre o recorte do mapa de Sergipe (evidenciando os municípios de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro) sobre as Classes de PG A/B e C respectivamente	61
Figura 15 – Dose total (TEDE) para uma janela de quatro dias em todas as distâncias e classes de Pasquill-Gifford	63
Figura 16 – TEDE para pulmão, mama e medula óssea em (a) classes A-B (b) classe C (c) classe D (d) classes E-F	65
Figura 17 – Relação do excesso de risco relativo para leucemia e tempo de latência (a) indivíduos do sexo feminino com idade menor ou igual a 20 anos (b) indivíduos do sexo masculino com idade menor ou igual a 20 anos (c) indivíduos do sexo feminino com idade maior que 20 anos (d) indivíduos do sexo masculino com idade maior que 20 anos	68
Figura 18 – ERR para tempos de exposição de 15 e 25 anos em indivíduos dos sexos masculino e feminino localizados a 4 e 8 km da fonte emissora	70
Figura 19 – Diferentes vias de exposição para as classes (a) A/B (b) C (c) D e (d) E/F	71
Figura 20 – Isodoses para as diferentes classes de PG (A) Classe A (B) Classe B (C) Classe C (D) Classe D (E) Classe E e (F) Classe F	72

Figura 21 – Janela do código HotSpot com dados de equivalentes de dose de radiação integrados de 50 anos para a inalação aguda de radionuclídeos por órgãos	74
Figura 22 – Observações meteorológicas de ventos anuais nas 16 direções para os grupos de ventos nas classes PG de A a G	76
Figura 23 – Gráficos de densidade populacional para os sexos (a) masculino (b) feminino (c) masculino e (d) feminino em Aracaju e Nossa Senhora do Socorro, respectivamente	77
Figura 24 – Mapa do evento disruptivo sob os dados censitários para as classes PG (a) A/B e (b) C em Aracaju	78
Figura 25 – População exposta com a expansão da pluma	78
Figura 26 – Mapa do evento disruptivo sob os dados censitários para as classes PG (c) A/B e (d) C em Nossa Senhora do Socorro	79
Figura 27 – População exposta com a expansão da pluma	79
Figura 28 – Análise da população exposta nas duas regiões	80
Figura 29 – Área da pluma sobre os aracajuenses e socorrenses expostos no cenário disruptivo de Classe C de Pasquill-Gifford	81
Figura 30 – Meteograma de Aracaju/SE para o período de 13/04/2026 a 20/04/2026	82
Figura 31 – Rosa dos Ventos para Aracaju-SE	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford	28
Tabela 2 – Valores de p para cada terreno e classe de PG	29
Tabela 3 – Coeficientes de dispersão horizontal e vertical no cenário urbano	33
Tabela 4 – Coeficientes de dispersão horizontal e vertical no cenário rural	33
Tabela 5 – Fatores de Ponderação de Tecidos	37
Tabela 6 – Relação entre Risco Excessivo e Excesso de Risco Relativo	41
Tabela 7 – Valores para o Risco Relativo	42
Tabela 8 – Coeficientes das Equações do Modelo BEIR V	44
Tabela 9 – Resumo das características da modelagem da pluma	51
Tabela 10 – Inventário do SMR simulado após 2 anos de operação	52
Tabela 11 – Parâmetros de entrada para a simulação no HotSpot	53
Tabela 12 – Relação de TEDE (Sv) para crianças e adultos em distâncias de 4 e 8 km da fonte emissora	69
Tabela 13 – Relação entre risco relativo (RR) por grupo e sexo (BEIR VII)	70
Tabela 14 – Total de habitantes segundo o Censo 2022 e sob a pluma radioativa . .	81
Tabela 15 – Exposição de indivíduos em faixas etárias por níveis de dose em Aracaju e NSS	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMAD	Diâmetro Aerodinâmico Médio
ARF	<i>Airbone Release Fraction</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada Limite Planetária
CLP	Camada Limite Planetária
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
Cs	Césio
DF	Fator de Depleção
QBRN	Agentes Químicos, Biológicos, Radiológicos e Nucleares
DR	<i>Damage Ratio</i>
ERR	Excesso de Risco Relativo
FGR	<i>Federal Guidance Report</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
ICRU	<i>International Committee for Radiological Units</i>
LLNL	<i>Lawrence Livermore National Laboratory</i>
MAR	<i>Material at Risk</i>
LPF	<i>Leak Path Factor</i>
PG	Pasquill-Gifford
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations</i>
SAR	Síndrome Aguda da Radiação
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
TEDE	Dose Efetiva Total Equivalente
BEIR	<i>Biological Effects of Ionizing Radiation</i>

NRCP	<i>National Council on Radiation Protection and Safety</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
GSR	<i>General Safety Requirements</i>
NRC	<i>U. S. Nuclear Regulatory Comission</i>
FCD	<i>Dose Conversion Factors</i>
GIS	Sistema de Informação Geográfica
JFD	<i>Joint Frequency Distribution</i>
RR	Risco Relativo
NPM	<i>NuScale Power Module</i>
$LD_{50/30}$	Dose Letal Mediana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ESE	Leste-Sudeste
SE	Sudeste
NE	Nordeste
SO	Sudoeste
ENE	Leste-Nordeste
SSE	Sul-Sudeste
OSO	Oeste-Sudoeste
NNO	Norte-Noroeste
AJU	Aracaju
NSS	Nossa Senhora do Socorro
SI	Sistema Internacional de Unidades
Gy	Gray
Sv	Sievert
Bq	Becquerel
DNA	Ácido Desoxirribonucleico

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
50-yr CEDE	<i>50-year Committed Effective Dose Equivalent</i>
MPs	Materiais Particulados
PAZ	<i>Precautionary Action Zone</i>
mSv	Milisievert

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Concentração média
g	Constante gravitacional
D	Dose
Γ_d	Taxa de lapso adiabático seco
d	diâmetro
D_a	Dose absorvida
I	Intensidade de turbulência
$\mathbf{u}$	Velocidade instantânea
t	Tempo
T	Temperatura
C_p	Calor específico a pressão constante
$\mathbf{U}$	Velocidade média
U	Componente x de $\mathbf{U}$
τ	Tensão viscosa
Re	Número de Reynolds
ρ	Massa específica
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade
L	Comprimento característico do sistema
μ	Viscosidade do fluido
ϕ	Variável da equação de transporte
P	Pressão média
u'	Componente flutuante da velocidade
Sc	Número de Schmidt
c'	componente flutuante da concentração

κ	Energia cinética turbulenta
δ	Delta de Dirac
K	Coeficiente de difusidade
σ	Coeficiente de dispersão (desvio-padrão)
λ	Constante de decaimento radioativo
π	Pí
Q	Taxa de emissão
v	Velocidade de deposição do material
A	Atividade
N	Número de átomos radioativos
$d\zeta$	Energia média depositada
dm	Elemento de massa
H_T	Dose Equivalente
W_R	Fator de ponderação da radiação
W_T	Fator de ponderação de tecido
$D_{T,R}$	Dose absorvida média
E	Dose Efetiva
γ	Gamma
β	Beta
α	Alpha
C'	Quantidade de material depositado no solo
$>$	Maior que
$<$	Menor que
r_0	Taxa básica para a idade e sexo
θ	Theta
$\leq$	Menor que

$\geq$ Maior que

Sobrescrito

c concentração

$'$ Flutuação instantânea da propriedade (aplicado em escoamento turbulento)

T Transposta

p Fator de ajuste da rugosidade do solo

Subscrito

t Turbulento

T Total

T Tecido

gr *Ground shine* (deposição no solo)

inh Inalação

im Imersão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	FASE DA EXPOSIÇÃO RADIOLÓGICA E NUCLEAR: O MOMENTO DA EMERGÊNCIA	23
2.2	AVALIAÇÃO DO IMPACTO RADIOLÓGICO EM LIBERAÇÕES AMBIENTAIS	24
2.3	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS	25
2.3.1	ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA	27
2.3.2	VARIÁVEL VELOCIDADE DO VENTO	28
2.4	DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE MATERIAIS RADIOATIVOS	29
2.4.1	ESCOAMENTO E DIFUSIDADE	31
2.4.1.1	MODELO GAUSSIANO DE DISPERSÃO	32
2.4.1.2	FATORES DE CONVERSÃO DE DOSE UTILIZADOS PELO HOTSPOT	34
2.5	GRANDEZAS DE RADIOPROTEÇÃO	35
2.5.1	ATIVIDADE	35
2.5.2	DOSE ABSORVIDA	36
2.5.3	DOSE EQUIVALENTE	36
2.5.4	DOSE EFETIVA	36
2.5.5	DOSE EFETIVA TOTAL EQUIVALENTE (TEDE)	38
2.6	RISCOS E EFEITOS À RADIAÇÃO IONIZANTE EM TECIDOS BIOLÓGICOS	39
2.6.1	EFEITOS DE REAÇÃO TECIDUAL	40
2.6.2	EFEITOS ESTOCÁSTICOS	40
2.7	MODELOS RADIOEPIDEMIOLÓGICOS	40
2.7.1	EXCESSO DE RISCO RELATIVO	41
2.7.2	DOSE LETAL MEDIANA ($LD_{50/30}$)	42
2.7.3	MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS	42
2.8	FUNDAMENTOS DOS REATORES MODULARES DE PEQUENO PORTE E AVALIAÇÃO DE DISPERSÃO RADIOLÓGICA EM CENÁRIOS URBANOS	44
3	METODOLOGIA	47
3.1	FERRAMENTAS UTILIZADAS NO TRABALHO	48
3.2	USO DO HOTSPOT HEALTH PHYSICS CODE	51
3.3	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	60
4	RESULTADOS	63
4.1	DOSE EFETIVA TOTAL EQUIVALENTE	63

4.2	CARACTERIZAÇÃO DOSIMÉTRICA E ZONAS CRÍTICAS	64
4.3	AVALIAÇÃO DO RISCO EPIDEMIOLÓGICO DE DESENVOLVIMENTO DE LEUCEMIA	67
4.4	ANÁLISES DAS CURVAS DE ISODOSES	72
4.5	VALORES DE INALAÇÃO DO RADIONUCLÍDEO NOS ÓRGÃOS E TECIDOS	73
4.6	DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA CONJUNTA (JFD)	74
4.7	ANÁLISE SEGUNDO O INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA	75
5	CONCLUSÃO	85
6	PERSPECTIVAS FUTURAS	86
7	RECURSOS UTILIZADOS	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

A gestão de emergências em cenários radiológicos/nucleares tem um caráter diferente de outros desastres, como os tecnológicos provocados. Essa diferença se deve aos desafios relacionados ao enfrentamento de efeitos que não se esgotam no momento do evento. A liberação não controlada de materiais radioativos na atmosfera desencadeia uma série de consequências que se propagam no espaço e no tempo, em escalas que superam a capacidade de resposta dos sistemas de saúde e da defesa civil.

O acidente nuclear de Chernobyl, em 1986, e o desastre radiológico de Goiânia em 1987, mostraram claramente que os danos mais extensos à saúde pública decorreram não apenas da exposição aguda inicial, mas também da incapacidade de se compreender, nas primeiras horas dos acidentes, as vias de contaminação, a população mais exposta e os órgãos biológicos mais afetados, resultando em exposições de longo prazo (1, 2). Em Chernobyl, a explosão e o incêndio de um reator nuclear liberaram grandes quantidades de material radioativo, incluindo cézio-137, que resultou na contaminação radioativa de grandes áreas antes que medidas de radioproteção fossem implementadas (3, 1). Em Goiânia, a cápsula abandonada do mesmo material radioativo resultou na contaminação silenciosa de, dezenas de pessoas, interna e externamente. Em ambas as situações, as ações de resposta só foram realizadas após a magnitude e as consequências da exposição de cada evento se tornarem evidentes (2).

A necessidade de superar as limitações de radioproteção dos acidentes de Chernobyl e Goiânia fortaleceu o desenvolvimento de ferramentas que permitam estimar de forma considerável a exposição da população em acidentes nucleares, auxiliando evacuações e abrigamentos, além de antecipar os riscos de longo prazo para a saúde pública. Neste sentido, o documento General Safety Requirements (GSR) estabelecido pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), apresenta uma estrutura para emergências radiológicas e/ou nucleares classificada em fases e medidas de urgência para cada cenário de exposição nas primeiras cem horas (4).

As ações realizadas na fase inicial após um acidente nuclear ou radiológico de maior impacto abrangem as primeiras horas após sua ocorrência, e visam reduzir o impacto imediato sobre a população, por meio de ações de evacuação, delimitação de áreas contaminadas, abrigamento e medidas de proteção para a tireoide. Nesse contexto inicial, as ações visam reduzir os danos, uma vez que não há informações completas sobre o acidente e o tempo para a decisão é curto (5). Após esse período, inicia-se a fase de remediação, que se estende por longos anos e, envolve ações voltadas à recuperação ambiental e ao acompanhamento contínuo da saúde da população exposta (6, 7).

Quanto à liberação atmosférica de radionuclídeos em decorrência de um acidente nuclear, como Chernobyl, a sua distribuição espacial depende não apenas da quantidade liberada, mas também de fatores meteorológicos que determinam o comportamento da pluma radioativa, como a velocidade e a direção do vento, a estabilidade térmica da camada limite atmosférica, a rugosidade do terreno e a presença de superfícies urbanas que alteram o escoamento (8, 9). Pluma radioativa é uma nuvem ou massa de partículas, gases e aerossóis suspensos no ar que contém material radioativo. Uma fonte emissora nas mesmas condições de liberação pode gerar contaminações distintas, que dependem das classes atmosféricas do momento e da região geográfica. Essas classes fazem com que certos municípios/cidades e até países sejam mais atingidos que outros. Para modelar a variação da estabilidade atmosférica neste trabalho, foi utilizado o conceito de classe de Pasquill-Gifford (classe PG) com base na velocidade do vento, radiação solar e cobertura de nuvens, que organiza as condições atmosféricas tomando conceitos de meteorologia, como classes instáveis (A) e estáveis (F), que avalia a temperatura do ar conforme a altitude (10).

O Cs-137 é um isótopo radioativo que emite radiação beta e gama, possuindo dois decaimentos β^- , onde o mais provável ocorre em 94,6% das vezes, com energia máxima de 0,5120 MeV e em 5,4% com energia máxima de 1,174 MeV. O nuclídeo resultante do decaimento mais provável é um nuclídeo metaestável que, após 2 minutos, decai emitindo um raio gama, com energia máxima de 0,6617 MeV. Devido à sua solubilidade em água e semelhança química com o potássio nas atividades celulares e na penetração metabólica (11, 12), apresenta a capacidade de se dispersar em grandes distâncias pelo ar, água, solo e superfícies. Essa característica amplia o risco de exposição da população a longo prazo a esse elemento em eventos com liberação ambiental de material radioativo, o que pode resultar em danos celulares graves, incluindo queimaduras, aumentando a probabilidade de desenvolvimento de carcinogênese (1).

As doses estudadas, a destacar a Dose Efetiva Total Equivalente (TEDE), englobam a dose equivalente de exposições internas e externas sobre todas as vias de contato do indivíduo com o material radioativo (13). O risco biológico derivado de uma mesma dose de radiação varia em função de quem a recebe, sendo as crianças e os adolescentes biologicamente mais sensíveis à radiação ionizante em razão da maior taxa de proliferação celular de seus corpos. Isso os torna mais vulneráveis à leucemia radioinduzida, enquanto os idosos têm menor capacidade de recuperação fisiológica (14, 15). A avaliação dos riscos biológicos são guiados pelos modelos radioepidemiológicos, como os modelos do Comitê de Efeitos Biológicos das Radiações Ionizantes (BEIR), do National Research Council (NRC). Esses modelos estabelecem duas comparações: BEIR V para doses iguais ou superiores a 100 mSv e BEIR VII para doses inferiores a esse limiar; apresentam a estrutura radioepidemiológica para estimar o excesso de risco relativo (ERR) de leucemia em função da dose, da idade de exposição, do sexo e do tempo de latência (16, 17).

Os cenários de dispersão atmosférica de materiais radioativos gasosos em ambientes urbanos, são explicados por simulações na dinâmica computacional dos fluidos (CFD) e envolve vários processos como deposição seca e úmida, difusão turbulenta, processos de advecção e outras transformações, onde a topografia do terreno urbano resulta em uma variação no impacto radiológico, que são justificados pela morfologia urbana (altura dos edifícios) e corredores de circulação dos ventos (18)

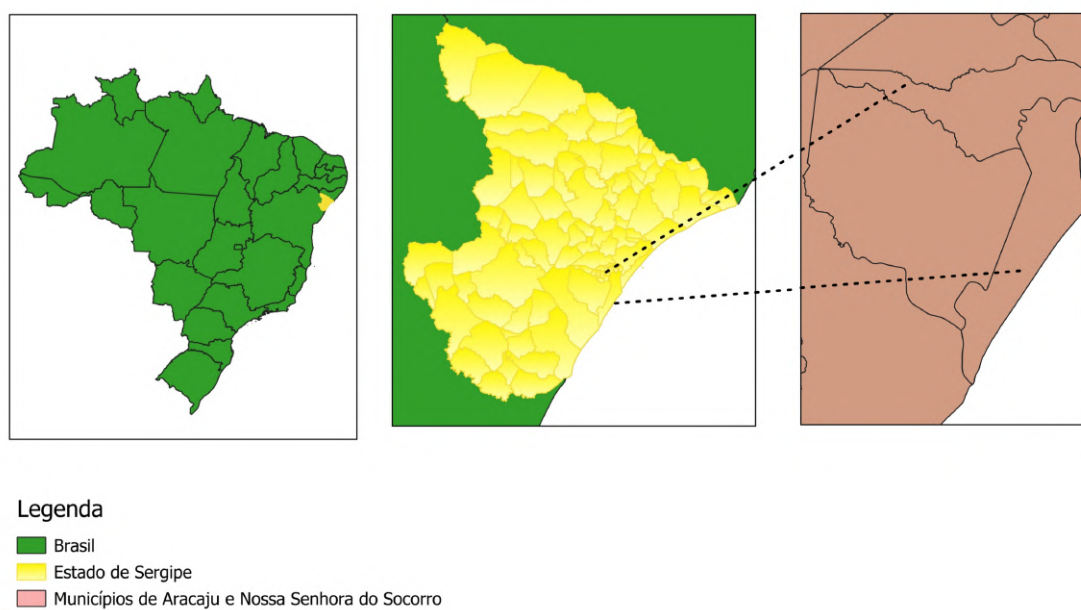
Em razão da crescente inserção da energia nuclear no ambiente nacional e, em particular, da emergência dos Pequenos Reatores Modulares (Small Modular Reactors - SMRs), os reatores de água leve (Light Water Reactors - LWR) apresentam aplicações variadas, desde baixo custo de implementação quando comparados aos reatores convencionais, transporte de fácil locomoção até uma grande potência energética, além de admitirem um modelo simples (19, 20). Pesquisas nacionais já demonstraram a viabilidade do uso do código computacional HotSpot *Health Physics Code* para simular a dispersão atmosférica de Cs-137 em cenários de acidente hipotético em SMRs em especial modelos análogos ao NuScale Power Module - NPM, que consideram as condições meteorológicas e medidas protetoras imediatas na fase inicial de eventos radiológicos (21, 22, 23). A perspectiva dessas instalações em regiões de alta densidade demográfica, como as capitais do Nordeste, torna relevante a avaliação dos impactos potenciais sobre centros urbanos, como Aracaju, o que justifica o esforço metodológico desta dissertação.

Nesta dissertação, os municípios de Aracaju, capital do estado de Sergipe e Nossa Senhora do Socorro configuram-se como cenários de referência, sendo o segundo utilizado pela expansão da análise, a Figura 1 apresenta o mapa cartográfico da região. A cidade de Aracaju apresenta uma população estimada de 602.757 habitantes, enquanto 192.330 residem em Nossa Senhora do Socorro. Aracaju concentra grande parte da população do estado, ampliando, assim, o número de indivíduos potencialmente expostos em qualquer cenário simulado de liberação atmosférica de material radioativo (24). A localização geográfica da cidade possibilita considerar características que tornam a análise ainda mais relevante, devido à foz do rio Sergipe, ambiente costeiro caracterizado pela dinâmica atmosférica e variações de vento. Isso torna a análise por Classes de PG sensível ao contexto das simulações desenvolvidas neste trabalho.

A utilização do software QGIS, com base nas análises do código HotSpot, teve por finalidade extrair os dados censitários das cidades de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro, considerando um cenário em que estas cidades estariam localizadas abaixo de uma pluma radioativa do evento simulado, com critérios de análise envolvendo grupos de interesse, como crianças e idosos.

Nesse cenário, o presente trabalho busca analisar o cenário urbano após um acidente nuclear com liberação de material radioativo, apoiado por modelagem computacional, capaz de estimar as zonas urbanas mais afetadas nas regiões de Aracaju e de Nossa Senhora

Figura 1 – Mapa cartográfico (político) da região estudada



Fonte: Autora

do Socorro, visando o suporte estratégico na fase inicial frente à situação de emergência. A justificativa se desenvolve ao longo da escolha do SMR que melhor se adequa a uma cidade de pequeno porte, como o cenário urbano enfrentaria uma situação desse tipo, quais zonas e grupos deveriam ser priorizados assim como, entender a influência da atmosfera da cidade diante da dispersão de efluentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentada uma revisão teórica com o objetivo de contextualizar os principais conceitos relacionados à avaliação de riscos em cenários de liberação ambiental de material radioativo. Inicialmente, são discutidas as fases de uma emergência radiológica e nuclear, conforme diretrizes internacionais, bem como os impactos radiológicos no meio ambiente decorrentes de eventos disruptivos, que são aqueles em que se interrompem o funcionamento das atividades cotidianas de uma população.

Em seguida, abordam-se os fundamentos da física das radiações, com ênfase nos efeitos biológicos das radiações ionizantes, nos princípios de dosimetria e nas práticas de radioproteção. Por fim, são apresentados os modelos epidemiológicos utilizados na avaliação de riscos à saúde e os conceitos associados à resiliência. Para os efeitos difusivos de materiais químicos, foram desconsiderados das análises processos de remoção como o decaimento radioativo e a deposição úmida (chuvas ou neve), configurando um cenário de máxima exposição. Os conceitos associados a resiliência são introduzidos para avaliar a capacidade dos sistemas biológicos e epidemiológicos de absorver os impactos no meio e reestabelecer o equilíbrio como uma nova adaptação.

2.1 Fase da exposição radiológica e nuclear: o momento da emergência

De acordo com o General Safety Requirements (GSR) (4), a resposta a uma emergência radiológica e nuclear deve ser orientada por um conjunto de diretrizes que auxiliam a tomada de decisão em diferentes momentos do evento, considerando tanto aspectos ambientais quanto de saúde pública. Essas diretrizes estruturam a resposta em fases distintas, definidas em função da urgência das ações necessárias e da evolução temporal do cenário de exposição.

O primeiro momento de resposta, denominado fase inicial, corresponde às primeiras etapas após a declaração da emergência e caracteriza-se pela necessidade de intervenções rápidas e coordenadas. Essa fase abrange, de forma aproximada, as primeiras cem horas após o início do evento e inclui duas subfases complementares: a fase urgente e a de remediação. Durante esse intervalo, as medidas adotadas visam reduzir os riscos imediatos à população e limitar a progressão da exposição radiológica.

Na fase urgente, as ações priorizam a proteção direta da população, incluindo estratégias como a evacuação de áreas afetadas, o controle de acesso a regiões contaminadas e a administração de agentes profiláticos, quando indicados. A fase seguinte, de remediação,

concentra-se na implementação de medidas destinadas a mitigar a exposição residual, incluindo a descontaminação ambiental, o monitoramento contínuo das taxas de dose e o suporte às populações impactadas, contribuindo para a estabilização progressiva da situação (6).

Após o encerramento da fase inicial, inicia-se a fase de remediação, que é de duração prolongada, frequentemente durando anos (25). Nessa etapa, o foco da resposta desloca-se do gerenciamento emergencial para as estratégias de recuperação e reabilitação. As ações passam a contemplar a avaliação dos efeitos da exposição a longo prazo, a reabilitação ambiental e a adoção de medidas de saúde pública voltadas ao acompanhamento contínuo da população exposta com o objetivo de restabelecer condições próximas à normalidade (7).

A definição das áreas de interesse para o monitoramento e a avaliação dos níveis de dose também varia conforme a fase de emergência. Nas etapas iniciais, quando predominam os riscos associados à exposição externa decorrente da passagem da pluma radioativa, as análises concentram-se em regiões mais próximas à fonte de liberação, tipicamente em um raio de até 2 km dessa fonte. À medida que a resposta evolui e os efeitos da deposição de material radioativo se tornam mais relevantes, o escopo das avaliações é ampliado, podendo abranger áreas com raio de até 10 km, de modo a contemplar tanto ambientes urbanos quanto rurais potencialmente afetados (7, 26, 27, 28).

2.2 Avaliação do impacto radiológico em liberações ambientais

A primeira etapa, a título de compreensão dos efeitos ambientais decorrentes da liberação não controlada de materiais radioativos na atmosfera, consiste na avaliação dos impactos radiológicos, em nível ambiental e de saúde pública, reunindo, nessa etapa, as tomadas de decisão. As avaliações dos impactos reúnem a caracterização da fonte, as vias de exposição às quais a população foi exposta, os tipos de processos de transferência que envolvem esse material e a avaliação da dose recebida por cada receptor (neste trabalho, o receptor foi considerado o ser humano) do evento (29, 30).

O ponto de partida deste estudo parte da caracterização da fonte emissora, definida pelo tipo e pela magnitude do evento disruptivo a ser analisado. Para essa caracterização, o primeiro passo consiste em determinar o inventário inicial de liberação dos radionuclídeos, a sua taxa de liberação e as suas propriedades físicas e químicas. Isso serve para modelar o comportamento dos radionuclídeos de interesse na atmosfera e o caráter emergencial da exposição (31).

As vias de exposição aos materiais particulados (MPs) compreendem os diferentes mecanismos pelos quais esses poluentes atingem a população. Uma das formas é a submersão direta na pluma radioativa, que resulta na inalação de partículas suspensas no ar, fazendo

com que a população exposta seja irradiada continuamente por radiação interna. A outra exposição envolve a deposição de radionuclídeos no solo, na pele, em vestimentas, por exemplo, resultando, a posteriori, em contaminação secundária devido à radiação externa. A compreensão do tipo de exposição permite entender a relação entre o radionuclídeo e os componentes do ambiente, como o ar, o solo e a água (32).

A caracterização dos parâmetros iniciais deste estudo possibilita determinar a concentração de radionuclídeos nos diferentes meios analisados, fornecendo os dados necessários para a estimativa da Dose Efetiva Equivalente Total (TEDE). A TEDE possibilita avaliar o impacto radiológico sobre a população exposta, considerando as diferentes vias de exposição, e torna-se um parâmetro para avaliar os riscos, viabilizando estratégias de resposta, como evacuação ou abrigo, frente à exposição (33). O conceito da TEDE será definido mais amplamente na Seção 2.5.5

2.3 Conceitos básicos sobre os fenômenos atmosféricos

A amplitude e o comportamento de uma pluma radioativa na atmosfera dependem da capacidade de transporte e diluição do poluente no meio a ser estudado. Esse alcance é governado pelo transporte advectivo pelo vento e a difusão turbulenta, processos que determinam se a pluma ficará restrita nas proximidades da fonte ou atingirá maiores proporções. Para compreender a modelagem de alcance da pluma, é necessária uma compreensão dos fatores que controlam a camada limite planetária (CLP).

A dinâmica do escoamento atmosférico na troposfera é profundamente condicionada pela interação com a superfície terrestre. Nessa região, o transporte de efluentes e contaminantes é influenciado por tensões cisalhantes (variação da direção do vento com a altura), forças de empuxo térmico e pela aceleração de Coriolis devido à rotação da Terra, além de ser influenciado por sistemas de maior escala, como os ventos térmicos e geostróficos (34).

Nesse contexto, destaca-se a Camada Limite Atmosférica (CLA), também denominada Camada Limite Planetária (CLP), uma zona estreita da troposfera onde se desenvolvem os principais processos de dispersão de poluentes. O comportamento do vento nessa camada é reflexo não apenas do escoamento superior, mas dos efeitos de fricção mecânica, da topografia local e dos fluxos de calor sensível trocados com o solo.

A magnitude vertical da CLA é variável e sensível a parâmetros como a rugosidade do terreno, a velocidade do vento e a localização geográfica. Esse dinamismo é principalmente evidenciado no período noturno, sob condições de ventos fracos e resfriamento radiativo da superfície, quando a CLA tende a diminuir significativamente, podendo atingir espessuras inferiores a 100 metros, favorecendo a formação de uma camada estável e termicamente estratificada próxima à superfície do solo (35, 36).

A avaliação do perfil térmico vertical da atmosfera é fundamental para determinar o grau de estabilidade atmosférica, fator que governa diretamente a capacidade de dispersão ou aprisionamento de poluentes e plumas radioativas. Com isso, utiliza-se como referencial a Taxa de Lapso Adiabático Seco (Γ_d), que estabelece a taxa teórica do resfriamento que uma parcela de ar seco sofre na atmosfera sem que haja troca de calor com o meio externo. Matematicamente, a Γ_d é deduzida a partir da combinação da equação de estado dos gases ideais com a Primeira Lei da Termodinâmica sob condições hidrostáticas e sendo definida pela razão entre a aceleração da gravidade (g) e o calor específico do ar a pressão constante (C_p), conforme expresso na Equação 2.1. O resultado dessa relação expressa um decréscimo térmico de aproximadamente $9,8\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$.

$$\Gamma = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{C_p} \quad (2.1)$$

Esse gradiente é fundamental para análises de estabilidade da CLA, atuando como parâmetro de comparação em relação ao gradiente térmico ambiental, determinando se as forças de empuxo irão inibir ou favorecer a dispersão vertical de poluentes (36).

O fenômeno de estratificação atmosférica, regido pela flutuabilidade térmica, demonstra que o movimento vertical de uma pluma é determinado pelas variações de densidade do ar em função da altitude. Em uma atmosfera instável, em que as massas de ar mais densas se sobrepõem a camadas menos densas, a convecção é favorecida. Em contrapartida, em condições de estabilidade, as camadas mais densas estão abaixo das mais leves, inibindo, assim, os movimentos verticais. Entre esses estados, a neutralidade atmosférica ocorre quando o gradiente térmico é nulo e os movimentos do ar são regidos por fatores mecânicos. Desse modo, atmosferas estáveis são associadas a ventos fracos e ausência de radiação solar, enquanto a instabilidade é potencializada por radiação intensa e maiores velocidades de vento (34, 37).

O regime de escoamento do ar na atmosfera e a dispersão de uma pluma poluente podem ser classificados pelo Número de Reynolds (R_e). Este parâmetro adimensional permite distinguir o regime de escoamento laminar do fluido, onde as forças viscosas predominam e suprimem as perturbações lineares, geralmente em baixos valores de (R_e) (ou seja, $R_e < 2300$), do regime turbulento ($R_e > 4000$), marcado pela predominância das forças inerciais e instabilidade de escoamentos (permitindo a formação de vórtices aleatórios) em diversas escalas de comprimento e frequência. Na CLA, o regime de escoamento do ar é predominantemente turbulento devido às grandes escalas geométricas e de velocidades envolvidas. Nessas proporções geográficas, a viscosidade molecular do fluido torna-se desprezível e insuficiente para dissipar as flutuações cinéticas do escoamento (38, 39, 40). A expressão matemática que define o Número de Reynolds é descrita pela Equação 2.2 a seguir

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (2.2)$$

onde ρ é a massa específica, u o vetor velocidade e L o comprimento do sistema, enquanto o μ denota a viscosidade do fluido.

Além dos fatores de previsibilidade da dispersão de contaminantes na atmosfera, os fenômenos de intensidade, direção do vento e topografia do terreno descrevem o perfil de distribuição dos contaminantes de interesse no cenário analisado. O conhecimento sobre a diversidade de cenários e a intensidade dos ventos possibilitam uma melhor tomada de decisão. Com isso, pode-se determinar situações possivelmente mais críticas e zonas contaminadas, permitindo a previsão do impacto não controlado de materiais radioativos para mitigar os riscos associados à exposição (41). As propriedades turbulentas da CLA são afetadas pela topografia do terreno onde o escoamento da pluma será analisado. Sendo assim, solos com poucas irregularidades, como rios, areia e neve, tipificam-se como terrenos que induzem menor turbulência; por outro lado, terrenos rugosos apresentam mais irregularidades devido à presença de plantações e edificações, que impedem o escoamento nas proximidades do solo, gerando turbulência (36).

2.3.1 Estabilidade Atmosférica

Modelos teóricos encontrados na literatura classificam a estabilidade atmosférica sob diferentes metodologias. A Teoria do Comprimento de Monin-Obukhov (1954) define a estabilidade de forma contínua e física da camada limite superficial a partir dos parâmetros de fluxo de calor e de quantidades de movimento para estabelecer uma escala de comprimento (L) associada à produção de turbulência mecânica e térmica. Em contrapartida, para cenários complexos, utiliza-se o modelo de Pasquill (1961), sendo este último adotado nesta dissertação. A classificação de Pasquill-Gifford (PG) é uma das metodologias tradicionais mais usadas para estimar a estabilidade atmosférica. Essa metodologia categoriza as condições ambientais em classes (variando de extremamente instáveis a estáveis, indicadas pelas letras de A a F, respectivamente) com base em variáveis de superfície, como a radiação solar global, velocidade do vento e cobertura de nuvens. A classificação por classes busca quantificar o perfil de estabilidade, facilitando a aplicação de modelos analíticos de dispersão de poluentes em cada classe.

A classe de PG do tipo A apresenta um ambiente extremamente instável e a do tipo, B moderadamente instável. A depender do evento simulado, as duas classes apresentam os mesmos resultados, que podem ser notados na referida seção. A classe de PG do tipo C infere um ambiente ligeiramente instável. As simulações utilizadas neste trabalho adotam esta classe como neutra quando comparada com as classes A e B, D neutro, na classe E está ligeiramente estável, na F moderadamente estável, e na classe G consta em análises. Neste estudo a classe G foi utilizada como comparativo entre as classes anteriormente

citadas e, apenas na Distribuição Conjunta, bem específicas (21). A Tabela 1 apresenta o perfil de classificação das estabilidades atmosféricas de A a F em função das variáveis velocidade do vento, período do dia, intensidade da radiação solar e cobertura das nuvens.

Tabela 1 – Classes de estabilidade atmosférica baseadas no modelo de Pasquill-Gifford (1961)

Velocidade do Vento (m/s)	Período Diurno (Radiação Global)			Período Noturno (Nuvens)	
	Forte	Mediana	Fraca	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
< 2	A	A–B	B	–	–
2 a 3	A–B	B	C	E	F
3 a 5	B	B–C	C	D	F
5 a 6	C	C–D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Nota: Em velocidades de vento menores que 2 m/s, assume-se a ausência de cobertura de nuvens no período noturno.

As últimas colunas da Tabela 1 representam a fração de cobertura das nuvens no céu durante a noite, medida na unidade meteorológica, chamada oitavas. Em $\geq \frac{4}{8}$ indica a noite com o céu de muito nublado a encoberto, denotando metade ou mais da abóbada celeste coberta por nuvens. Enquanto que $\leq \frac{3}{8}$ representa um céu parcialmente nublado, em três oitavas ou menos com nebulosidade. A partir da Tabela 1, tem-se que em condições de forte instabilidade atmosférica, como nas classes de PG A e B existe uma intensa mistura turbulenta de maneira vertical. Esse mecanismo acelera o processo de dispersão por meio da diluição progressiva dos contaminantes no ar limpo. Em contrapartida, sob condições de estabilidade atmosférica (Classe E e F), o escoamento tende a se estratificar em camadas horizontais com diferentes densidades e temperaturas, o que inibe os movimentos verticais, favorece o confinamento e a acumulação de materiais radioativos nas proximidades da fonte emissora. Por fim, no cenário de neutralidade D (neutra ou ligeiramente estável), o clima observado é nublado, com ventos fortes ou durante os períodos de transição do crepúsculo (alvorecer e anoitecer), onde as forças de empuxo se tornam desprezíveis.

2.3.2 Variável Velocidade do Vento

Como discutido, a dispersão de poluentes sofre influência da estabilidade atmosférica e das características do terreno (42). Alguns modelos matemáticos descrevem a velocidade do vento utilizando a lei de potência, descrita pela Equação 2.3

$$u(H) = u(z) \left(\frac{H}{z} \right)^p \quad (2.3)$$

A variável $u(H)$ denota a relação entre a velocidade do vento e a altura H da fonte emissora. A velocidade do vento em m/s é expressa por $u(z)$ em uma altura de referência

z (em m), p é o fator de ajuste que depende da rugosidade do solo (z_0) e das Classes de PG, (Tabela 2). Para cada classe há um fator de ajuste característico para o terreno de interesse (36).

Tabela 2 – Valores de p para cada terreno e classe de estabilidade atmosférica (23)

Tipo de Terreno	Classe de Estabilidade (Classe de PG)					
	A	B	C	D	E	F
p – Terreno rural	0,07	0,07	0,10	0,15	0,35	0,55
p – Terreno urbano	0,15	0,15	0,20	0,25	0,40	0,60

Em um cenário de eventos disruptivos em que há dispersão atmosférica de material radioativo, a altura de liberação efetiva (H_{ef}) do material de interesse apresenta grande relevância em terrenos urbanos. Isso ocorre devido a rugosidade superficial que é significativamente maior próximo ao solo, uma vez que as edificações e estruturas verticais atuam como obstáculos aerodinâmicos que modificam o perfil do vento, gerando zonas de estreita turbulência e cavidades de ar que alteram a trajetória da pluma.

2.4 Dispersão Atmosférica de materiais radioativos

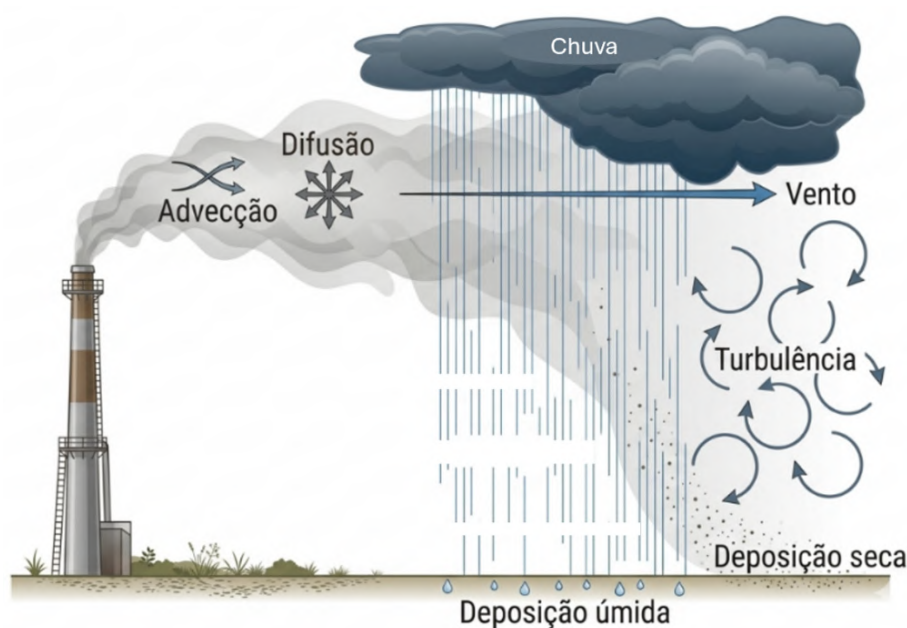
O conceito de dispersão atmosférica considerado neste trabalho refere-se ao fenômeno que combina os efeitos da advecção, representado pelo transporte de poluentes pelo vetor vento e da difusão turbulenta, também conhecida por dispersão, em que a mistura das partículas atmosféricas em movimento se envolve com as moléculas de ar (43, 21, 44, 23). A dispersão de efluentes é governada pelo momento linear (quantidade de movimento) e pelas forças de empuxo térmico. A forma de dispersão é determinada pela predominância de uma dessas forças: se o momento linear prevalece, o escoamento se adequa a um jato, se a força de empuxo predomina, a forma configura-se como uma pluma. É comum que o fenômeno inicie na forma de jato e transite para o regime de pluma, sendo esta a última forma adotada neste trabalho.

Além dos transportes anteriormente citados (advecção e difusão), a pluma também pode sofrer depleção, que consiste na redução da concentração, da massa de contaminantes suspensos à medida que a massa de ar se desloca da fonte emissora. Esse decréscimo de material no inventário da pluma atmosférica decorre de processos físicos de remoção, os quais são classificados em deposição seca (transferência direta de materiais particulados devido aos efeitos de gravidade, efeitos difusivos turbulentos e/ou moleculares e processos de sedimentação, sem a presença de chuva) ou por deposição úmida (lavagem da pluma por precipitação, como chuva ou neve, também conhecido por *washout*). A Figura 2 ilustra os mecanismos de transporte de aerossóis radioativos na atmosfera (21, 45, 28).

Esta dissertação concentra-se no estudo sobre liberação ambiental de material radioativo, sendo imperativo detalhar a fonte emissora do material e os parâmetros meteorológicos considerados. Tais informações são fundamentais para caracterizar o transporte de radionuclídeos e avaliar com precisão a dispersão desses contaminantes, bem como os possíveis impactos da sua liberação sobre os ecossistemas e a saúde pública dos indivíduos expostos (46).

Entre as formas geométricas de fonte emissora de materiais radioativos estão a pontual, a planar e a volumétrica. A forma comumente adotada para a dispersão atmosférica é a pontual, por oferecer um rigor matemático facilitado. O formato da pluma radioativa pode ocorrer nas configurações contínua, instantânea ou intermediária, podendo ocorrer em mais de um formato. A fonte emissora pode estar em posição elevada, representada por uma chaminé, ou à altura do solo (36).

Figura 2 – Mecanismo de liberação e transporte de aerossóis radiativos na atmosfera



Fonte: Adaptado de (47) pelo Gemini

A dispersão de radionuclídeos liberados por incidentes e/ou acidentes nucleares, configura um caso tecnológico, cuja descrição minuciosa extrapola os objetivos deste estudo, uma vez que as consequências se concentram na liberação desse material para a natureza. As consequências mais graves ou imediatas da exposição radiológica ocorrem de forma acidental ou intencional. Dessa forma, a distribuição dos efeitos sobre a população depende de variáveis como o inventário nuclear liberado para o meio ambiente, altura de liberação do material radioativo, o tipo de liberação (pulsos, contínuo ou instantâneo), as condições meteorológicas locais, a existência de proteção por meio de abrigos no local contaminado, além da topografia do terreno onde a pluma depositará os contaminantes (48). De maneira esquemática, a Figura 3 apresenta um esboço da liberação da pluma radioativa causada

por um incidente nuclear.

Figura 3 – Esboço esquemático da pluma radioativa proveniente de um acidente nuclear com contaminação ambiental



Fonte: Adaptado de (49)

A dispersão de radionuclídeos na CLA é governada pelo regime turbulento, dada pela magnitude das escalas e as velocidades de escoamento envolvidas em cada uma, descritas como cascata de energia (38). Assim, à medida que a velocidade do escoamento atmosférico aumenta, as forças inerciais passam a predominar, fazendo com que o fluxo assuma um caráter caótico e aleatório (35, 49). A transição para esse regime é quantificada pelo Número de Reynolds (Re), parâmetro adimensional que demonstra como, na Camada Limite Atmosférica, as forças inerciais superam as viscosas, resultando em um movimento caótico do fluido com o aumento da mistura, conhecido como difusividade turbulenta. Na dinâmica dos fluidos computacional (CFD), as resoluções dessas flutuações exigem o fechamento das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Enquanto os modelos de escoamento turbulento pela abordagem de RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), utiliza uma estatística detalhada das tensões turbulentas, sua aplicação em cenários de emergência apresenta um alto custo computacional. Em contrapartida, o modelo gaussiano, justifica a transição entre as características físicas do escoamento e a viabilidade das simulações de dispersão realizadas neste trabalho.

2.4.1 Escoamento e Difusidade

O coeficiente de difusividade turbulenta (K_t) define a taxa de mistura do escoamento variando no espaço e no tempo. A fim de determinar K_t , o modelo de Gifford e Briggs simplifica a difusão atmosférica nas direções horizontais (perpendicular ao vento) e verticais em função dos parâmetros de dispersão σ_y e σ_z , respectivamente. Esses parâmetros representam o desvio-padrão da distribuição de concentração da pluma e são determinados explicitamente a partir das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (36, 50), por meio de equações empíricas para cenários de terrenos urbanos e rurais.

$$\sigma_y^2 = 2K_{yy} \frac{x}{U} \quad (2.4)$$

$$\sigma_z^2 = 2K_{zz} \frac{x}{U} \quad (2.5)$$

As equações 2.4 e 2.5 baseiam-se em um sistema de coordenadas cartesianas cujo eixo principal (x) é alinhado à direção do vento médio. Assim, a geometria adotada na formulação de Gifford e Briggs, assume que o transporte advectivo na direção do escoamento predomina sobre a difusão longitudinal. Dessa forma, a dispersão concentra-se apenas nos coeficientes de difusão lateral (K_{yy}) e vertical (K_{zz}), que denotam os desvios-padrão da distribuição gaussiana de concentração da pluma, desprezando as demais direções de turbulência. No âmbito da dispersão de contaminantes, Briggs propôs equações que interpolam σ_y e σ_z em função da distância à fonte emissora, correlacionando as teorias de Pasquill-Gifford com os dados experimentais do National Laboratory e da Tennessee Valley Authority. Desse modo, esses desvios-padrão (Equações 2.6 e 2.7) são calculados por meio de parâmetros empíricos (a_y , a_z , b_y , b_z , γ_y e γ_z) cujos valores numéricos variam mediante o cenário escolhido (terreno rural ou urbano) e da classe de estabilidade atmosférica local, obedecendo à estrutura geral das equações apresentadas anteriormente.

$$\sigma_y = a_1 x (1 + b_1 x)^{c_1} \quad (2.6)$$

$$\sigma_z = a_2 x (1 + b_2 x)^{c_2} \quad (2.7)$$

As Tabelas 3 e 4 evidenciam a influência dos coeficientes característicos da dispersão atmosférica sobre as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford, em consonância com os tipos de terreno por onde o material radioativo circulará. Esses coeficientes são importantes para o cálculo de σ_y e σ_z , que representam as dispersões laterais e verticais, respectivamente, do contaminante.

Esses valores são utilizados em modelos analíticos da avaliação de risco e proteção radiológica, ajustados mediante o cenário de estudo, contribuindo para uma visão mais realista frente ao evento que facilite a tomada de decisões.

2.4.1.1 Modelo gaussiano de dispersão

Entre as limitações conhecidas dos modelos gaussianos está a maior margem de erro nas variáveis simuladas, decorrente das simplificações da abordagem analítica. Porém, essa característica é compensada pelo baixo consumo de recursos computacionais, o que torna esse tipo de modelo adequado para respostas rápidas em situações de emergência. No presente trabalho, o modelo foi aplicado para avaliar a dispersão do radionuclídeo

Tabela 3 – Coeficientes de dispersão horizontal e vertical no cenário urbano (51)

Classes de PG	σ_y			σ_z		
	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
A	0,22	0,001	−0,5	0,200	0	0
B	0,16	0,001	−0,5	0,120	0	0
C	0,11	0,001	−0,5	0,080	0,0020	−0,5
D	0,08	0,001	−0,5	0,060	0,0015	−0,5
E	0,04	0,001	−0,5	0,030	0,0003	−0,5
F	0,04	0,001	−0,5	0,016	0,0003	0,5

Tabela 4 – Coeficientes de dispersão horizontal e vertical no cenário rural (51)

Classes de PG	σ_y			σ_z		
	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
A/B	0,32	0,004	−0,5	0,240	0,001	0,5
C	0,22	0,004	−0,5	0,200	0	0
D	0,16	0,004	−0,5	0,140	0,0003	−0,5
E/F	0,11	0,004	−0,5	0,080	0,0015	−0,5

Cs-137 na atmosfera, a distâncias entre 0,1 e 10 km da localidade do evento, durante as primeiras 100 horas do evento (52, 23). Essa localidade foi definida como sendo a posição inicial da fonte pontual do radionuclídeo.

Os modelos gaussianos de dispersão atmosférica descrevem a distribuição espacial e temporal de contaminantes na camada limite da atmosfera, também conhecida como pluma radioativa. Essa distribuição, fundamenta-se na equação de Gauss, que considera que a concentração de poluentes ou de material radioativo disperso no meio obedece uma distribuição normal no plano transversal (y e z) à direção do vento (23). A concentração química dispersa em forma de aerossol segue uma distribuição normal, com pico ao longo do eixo central da pluma. A dispersão ocorre nas direções horizontal (σ_y) e vertical (σ_z). Dessa forma, os coeficientes de difusividade turbulenta lateral e vertical são tratados como funções exclusivas da distância a favor do vento: $K_{yy} = K_{yy}(x)$ e $K_{zz} = K_{zz}(x)$. Assume-se, ainda, que a turbulência atmosférica é estacionária e homogênea, assim, a propagação da pluma resulta da advecção na direção do escoamento e da difusão turbulenta nas demais direções (42).

Para os cálculos da dispersão gaussiana, foi considerada uma altura efetiva de emissão (H) sendo essa altura um parâmetro central para a abordagem conservadora, sem

troca de calor com a atmosfera. Configurando um ambiente isotérmico, em que, a altura efetiva da emissão da pluma tem a altura física da chaminé ($H = 10 \text{ m}$). A velocidade do vento foi dada de forma unidimensional em x , $\mathbf{U} = (u, 0, 0) \text{ [m/s]}$.

Com base nas hipóteses descritas, a concentração volumétrica $C(x,y,z) \text{ [Bq/m}^3\text{]}$ de um contaminante emitido por fonte pontual é obtida pela Equação de Dispersão Gaussiana, conforme apresentado na Equação 2.8

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.8)$$

sendo Q a taxa de emissão (Bq/s), u a velocidade média do vento (m/s), H é a altura efetiva da chaminé (m), σ_y e σ_z são os coeficientes de dispersão (m).

O código *HotSpot Health Physics Code* constrói o modelo analítico por meio das Classes de PG e a modelagem Gaussiana, descrita pelos coeficientes anteriormente citados (23, 53). Dessa forma, ao se comparar as Classes A/B e F/G, fica destacado que as classes instáveis apresentam maiores coeficientes verticais, σ_z , que a classe a F/G. Além dos efeitos de transporte advectivo (deslocando através de movimento macroscópico de um fluido) e difusivo, a modelagem deve incluir os processos de remoção já discutidos (23). Dessa forma, a Equação 2.8 é complementada por fatores multiplicativos que representam o decaimento radioativo do isótopo e a depleção da pluma por deposição (seca e úmida), como mostra a Equação 2.9

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} e^{\frac{-\lambda x}{U}} DF(x) \quad (2.9)$$

sendo λ a constante de decaimento radioativo (s^{-1}) e DF o fator de depleção da pluma expresso pela Equação 2.10

$$DF = \left\{ \exp \left[- \int_0^x \frac{1}{\sigma_z^2 \exp\left(\frac{1}{2} \frac{H}{\sigma_z}\right)^2} d\xi \right] \right\} \quad (2.10)$$

onde a velocidade de deposição do material no solo v é dado em (cm/s) e x (em m) é a distância, na direção do vento, em relação à origem da liberação.

2.4.1.2 Fatores de Conversão de Dose Utilizados pelo HotSpot

O código computacional do HotSpot metodologias frequentemente utilizadas em dosimetria de radiações, recomendadas pela International Commission on Radiological Protection (ICRP, 1991), para conversões da concentração de radionuclídeos recebida pelo público em geral (54).

Para calcular a Dose Efetiva Total Equivalente (TEDE), o código realiza o somatório das contribuições de todas as vias de exposição as quais o indivíduo humano foi exposto, como inalação, imersão sobre a pluma, ressuspensão e deposição de material radioativo no solo. Para converter a exposição em dose biológica, o código utiliza os coeficientes de dose estabelecidos no relatório oficial norte-americano FGR-11 (*Federal Guidance Report No. 11*). Esse documento fornece os fatores de conversão dosimétrica para as diferentes vias de exposição a radionuclídeos, fundamentados nas diretrizes da publicação ICRP-30 de 1981 (55). As bibliotecas presentes no HotSpot são divididas conforme os modelos da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP30 e ICRP66), sendo constantemente atualizadas por documentos que fornecem cálculo doses de exposição externa e interna (56, 57, 54, 55, 58, 38).

2.5 Grandezas de Radioproteção

As grandezas e unidades em Radioproteção são em sua maioria recomendadas por órgãos internacionais, como o Comitê Internacional de Unidades Radiológicas (*International Committee for Radiological Units - ICRU*), que define as grandezas básicas da física relacionadas a radiação. As grandezas operacionais, como fluência e dose equivalente ambiente, são definidas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission Radiological Protection - ICRP*). A ICRP, define quais grandezas devem ser usadas para indicar riscos à saúde humana em decorrência de exposição às radiações ionizantes, assim como limiares de dose. Ambas as comissões descrevem os padrões de organização das medidas de radioatividade envolvendo a interação da radiação com a matéria, bem como a quantificação dos efeitos determinísticos ou estocásticos (59) decorrentes das exposições.

2.5.1 Atividade

A atividade (A) de um radioisótopo corresponde ao número de desintegrações ocorridas em uma amostra do radioisótopo por unidade de tempo. Tendo-se que um núcleo instável se desintegra em outro em busca de estabilidade, quanto maior o número de átomos radioativos (N) em uma amostra, maior será o número de desintegrações (λ) desses átomos, e, conseqüentemente, maior a quantidade de radiação emitida pela amostra. A atividade é expressa de forma matemática conforme mostra a Equação 2.11

$$A = \lambda \cdot N \quad (2.11)$$

A unidade de medida da Atividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o becquerel (Bq), equivalente a uma desintegração por segundo. A primeira unidade

usada para a desintegração nuclear foi o curie (Ci), com uma equivalência com a unidade anteriormente, expressa por $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

2.5.2 Dose Absorvida

A Dose Absorvida (D) é uma grandeza definida como a razão entre a energia transferida pela interação da radiação com a matéria e a sua massa. De forma a quantificar a transferência de energia na interação entre a radiação e a matéria. A unidade de D é descrita em termos de J/kg , denominada de gray (Gy), representada na Equação 2.12

$$D = \frac{d\xi}{dm} \quad (2.12)$$

sendo D a dose absorvida e, $d\xi$ a energia média depositada no elemento de massa dm (60).

2.5.3 Dose Equivalente

A Dose Equivalente no órgão ou tecido T (H_T) foi introduzida para estabelecer uma correlação direta entre os efeitos biológicos induzidos por diferentes tipos de radiação, corrigindo as diferenças na eficácia biológica de cada uma delas. Para isso, aplica-se um fator de ponderação da radiação R (w_R) que é uma grandeza adimensional e multiplicativa associada ao tipo e à qualidade da radiação incidente R . Esse fator multiplica a dose absorvida média, ($D_{T,R}$) depositada pela radiação R no órgão ou tecido de estudo T (61). Dessa forma, a expressão matemática para o cálculo da dose equivalente, considerando o somatório caso haja vários tipos de radiação incidentes, é expressa (62) e apresentada na Equação 2.13

$$H_T = w_R D_{T,R} \quad (2.13)$$

A partir desse conceito, define-se a Taxa de Dose Equivalente ($\dot{H}_T$) como a dose equivalente acumulada por unidade de tempo, expressa pela derivada temporal da dose ($\dot{H}_T = \frac{dH_T}{dt}$). No Sistema Internacional (SI), a dose equivalente assim como a dose absorvida são medidas sievert (Sv), a taxa de dose é definida em sievert por unidade de tempo. O fator de ponderação (w_R) é definido para abranger tanto cenários de exposição externa quanto interna de radionuclídeos (63). Esses fatores variam de acordo com o poder de ionização da radiação. Neste trabalho, considerando o perfil de emissão dos radionuclídeos de interesse para o cenário de dispersão atmosférica avaliado, o fator de ponderação adotado apresenta um valor unitário ($w_R = 1$).

2.5.4 Dose Efetiva

Os diferentes tecidos e órgãos do corpo humano respondem de maneiras específicas à radiação. Para mensurar o risco total de que se tenha efeitos estocásticos ou determinísticos decorrente de exposições, utiliza-se a grandeza Dose Efetiva (E). Essa grandeza

permite correlacionar o dano biológico em órgãos específicos ao risco equivalente de uma irradiação de corpo inteiro. Para tanto, a ICRP junto à NCRP (*National Council on Radiation Protection and Measurements*) estabeleceu os fatores de ponderação de tecido, w_T , apresentados na Tabela 5. Esses fatores são adimensionais e representam a contribuição de cada órgão ou tecido, de modo que o somatório de todos os componentes w_T é igual a 1.

Tabela 5 – Fatores de ponderação de tecidos (w_T)

Órgãos e Tecidos	w_T
Gônadas	0,04
Medula Óssea (vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Mama	0,12
Bexiga	0,04
Fígado	0,04
Esôfago	0,04
Tireoide	0,04
Pele	0,01
Superfície Óssea	0,01
Restante*	0,00923 – 0,00462

***Nota:** Os dados referem-se a uma população de referência com números iguais de ambos os sexos e uma ampla faixa etária. Na definição de dose efetiva, aplica-se a trabalhadores, à população total e a ambos os sexos. Os valores restantes englobam: adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, timo e útero/cólon, respectivamente.

Fonte: Adaptada de (9, 64)

Dessa forma, a dose equivalente H_T fornece uma quantidade que relaciona o dano geral a um indivíduo, se forem independentes do valor de T , cujos danos relacionam à mortalidade, morbidades para cânceres e efeitos genéticos. Com isso, os riscos de um efeito estocástico sobre um indivíduo são representados pela dose efetiva, E , que totaliza as doses equivalentes ponderadas em todos os tecidos, conforme descrito na Equação 2.14. No SI, a dose efetiva possui a mesma unidade de medida que a dose equivalente, ou seja, sievert (Sv).

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (2.14)$$

2.5.5 Dose Efetiva Total Equivalente (TEDE)

Uma dose equivalente pode ser decorrente de irradiação interna, envolvendo a ingestão ou inalação do material radioativo, e de radiação externa, pelo contato da pele, dos cabelos ou ainda das roupas contaminadas por material radioativo (49). Dessa forma, a TEDE denota a soma de todas as doses equivalentes provenientes das fontes (internas e externas), causadoras dos danos ao organismo. A TEDE representa uma dose de corpo inteiro utilizada no âmbito da proteção radiológica, mas, não substitui as outras doses, anteriormente citadas. Neste estudo, o valor total da TEDE foi estabelecido de forma conservadora como avaliação inicial, para superestimar o evento.

No campo da dispersão ambiental de um material radioativo, o cálculo da TEDE tem aplicações em casos de contaminação externa ao corpo, incorporando uma associação de doses imersas em uma pluma radioativa ou ainda, de deposição de um material no solo (chamado de ground shine) descrita pelas Equações 2.15 e 2.16. A parcela referente à contaminação externa por imersão na pluma atmosférica é calculada pela Equação 2.15. A contribuição da deposição de material radioativo no solo (*groundshine*) é apresentada na Equação 2.16. Por fim, a TEDE decorrente da contaminação interna, é calculada pela Equação 2.17 (23).

$$TEDE (Sv)|_{im} = C \left(\frac{Bq}{m^3} \right) \times DFC_{im} \left(\frac{Sv}{Bq/m^3} \right) \quad (2.15)$$

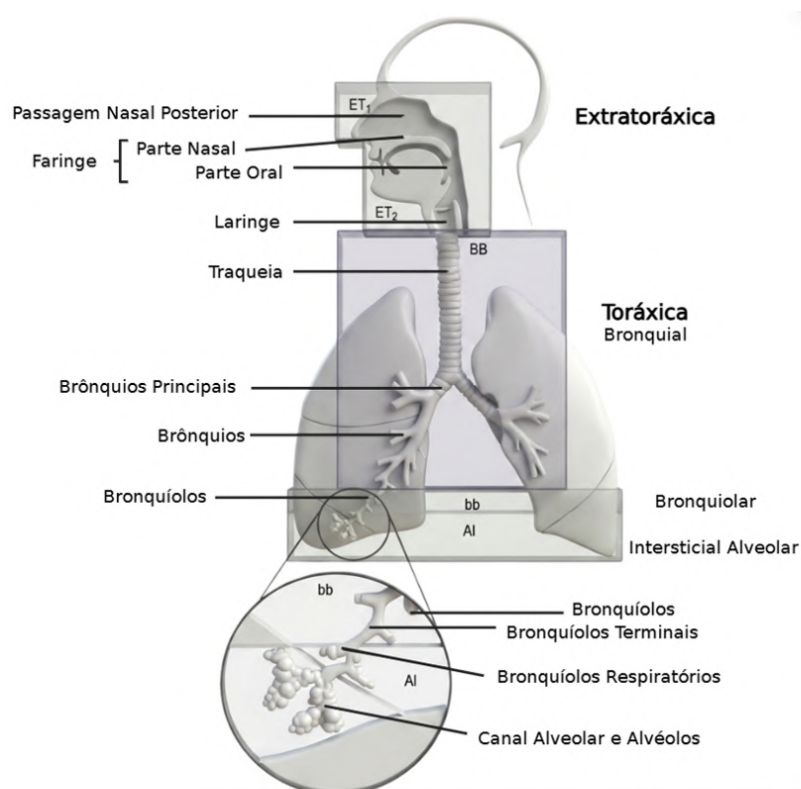
$$TEDE (Sv)|_{gr} = C' \left(\frac{Bq}{m^2} \right) \times DFC_{gr} \left(\frac{Sv}{Bq/m^2} \right) \quad (2.16)$$

$$TEDE (Sv)|_{ina} = C \left(\frac{Bq}{m^3} \right) \times DFC_{ina} \left(\frac{Sv}{Bq} \right) \times R_{ina}(m^3) \quad (2.17)$$

As Equações 2.15 e 2.17 determinam, respectivamente, as parcelas da TEDE para os processos de imersão na pluma e de inalação de radionuclídeos. Nessas equações, C representa a concentração volumétrica do material radioativo no ar em um determinado ponto de interesse, enquanto C' , na Equação 2.16 indica a quantidade de material radioativo depositado no solo. Os termos DFC_{im} e DFC_{ina} representam os fatores de conversão de dose para as vias de exposição externa (pela imersão) e interna (inalação), e R_{ina} denota a quantidade de ar respirável para um ser humano integrada ao longo do tempo do período de exposição. À radiação emitida pelo solo contaminado (*groundshine*), DFC_{gr} , expressa o fator de conversão para a dose depositada no solo.

As frações de retenção do radionuclídeo Cs-137 são destacadas para cada fator de absorção do material particulado por uma pessoa adulta. Devido à sua rápida absorção, quase todo o material particulado se deposita nas regiões da laringe, traqueia, brônquios e bronquíolos, que estão destacadas na Figura 4 (65).

Figura 4 – Trato respiratório

Created in BioRender.com 

Fonte: Adaptado de (65) pelo BioRender

Neste caso, destaca-se que a dose total acumulada é diretamente proporcional ao tempo que um indivíduo permanece naquela área geográfica exposto ao evento. Isso ocorre devido a taxa de dose, definida como a magnitude da dose absorvida ou equivalente por unidade de tempo. Na modelagem de dispersão atmosférica de radionuclídeos, as taxas de dose indicam a intensidade da radiação e possibilitam a decisão de proteção radiológica com tempo hábil dentro da pluma. A literatura de resposta a emergência nucleares e radiológicas estabelece que as primeiras horas após o acidente constituem a fase de resposta imediata ou urgente. Nesse período o monitoramento contínuo dessas taxas é a prioridade para a definição de estratégias de evacuação e abrigo, evitando os efeitos determinísticos na população (66, 67).

2.6 Riscos e Efeitos à Radiação Ionizante em Tecidos Biológicos

A definição de radiação ionizante remete à capacidade da radiação de ionizar o meio absorvedor (molécula ou átomo) exposto, no qual a transferência integral ou parcial da energia da radiação para átomos e moléculas ocorre por meio da ionização. Portanto, a radiação possui um caráter ondulatório, se comportando como onda eletromagnética incluindo os raios x e raios γ , ou particular como partículas atômicas e subatômicas, como

os elétrons, prótons, íons pesados e entre outros (68). Os efeitos biológicos provocados pela radiação ionizante possuem uma natureza variável, dependendo de fatores como taxa de dose, dose total recebida e localização (órgão/tecido alvo ou corpo inteiro).

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes dependem diretamente do tipo de exposição, que pode originar-se de fontes externas ou fontes internas. No caso de exposições agudas de corpo inteiro a fontes externas, os efeitos manifestam-se como Síndrome Aguda da Radiação (SAR), caracterizada por danos à integridade do DNA e às funções celulares (69, 70). Essa fisiopatologia envolve tanto efeitos determinísticos imediatos, cuja a gravidade depende do nível da dose e da velocidade de exposição, variando de náuseas e vômitos a sintomas neurológicos e falência múltipla de órgãos, quanto os efeitos estocásticos a longo prazo, como o câncer (69, 70). Em atividades laborais envolvendo uso de radiação ionizante, o monitoramento individual de trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação externa ou interna torna-se essencial para avaliar o impacto dessas exposições aos tecidos biológicos (71).

2.6.1 Efeitos de Reação Tecidual

Os efeitos determinísticos são aqueles que surgem em curto tempo, de minutos a dias, a partir de um limiar de dose, com a intensidade do efeito proporcional à dose recebida. A exposição à radiação ionizante que resulte em doses altas impacta predominantemente o sistema hematopoético. Numa população irradiada, a dose letal mediana ($LD_{50/30}$) leva a 50% de óbitos em aproximadamente 30 dias. Sendo o fator de ponderação de adultos saudáveis, a dose letal corresponde, de maneira aproximada, a valores de 4 e 5 Sv de doses em curtos intervalos de tempo (69, 53, 46, 72).

2.6.2 Efeitos Estocásticos

Os efeitos estocásticos são previstos por meio de uma relação probabilística que depende da dose, sem um nível seguro definido, porém, fundamentada no caráter genético e somático dos efeitos da exposição à radiação ionizante. A indução do câncer por efeito da radiação pode ocorrer após alguns anos ou até décadas (em cânceres sólidos) de exposição, com tempo de latência curto, de 2 a 5 anos após a exposição do indivíduo. Segundo a UNSCEAR (30), a indução do câncer radioinduzido está associada a alterações genéticas e somáticas, incluindo mutações no DNA, podem progredir para uma transformação celular maligna.

2.7 Modelos Radioepidemiológicos

O risco radiológico refere-se à probabilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde decorrentes da exposição à radiação ambiental, podendo constituir uma variável relevante

na avaliação da resiliência de uma zona de interesse. Dessa forma, o risco radiológico tem um caráter operacional, representado pela TEDE e pelas consequências sobre o ambiente (efeitos somáticos e/ou genéticos), bem como por um caráter epidemiológico, conforme definido pelos comitês BEIR V e BEIR VII (17, 73).

2.7.1 Excesso de Risco Relativo

O Excesso de Risco Relativo (ERR, do inglês *Excess Relative Risk*) é um parâmetro fundamental dentro dos modelos radioepidemiológicos para quantificar o aumento na probabilidade relativa de ocorrência de uma doença associada a exposição à radiação ionizante ou a um fator de risco específico (74). Em radioproteção, o ERR estima o risco de câncer e de outros efeitos associados à saúde decorrentes da exposição à radiação ionizante, ou seja, a dose-resposta. O ERR diminui em uma unidade o Risco Relativo (RR). De maneira matemática, o ERR é igual à diferença de RR e 1, sendo RR a frequência de um evento entre dois grupos, o exposto e não exposto, a Tabela 6 apresenta as relações entre os dois riscos.

Tabela 6 – Relação entre Risco Relativo (RR) e Excesso de Risco Relativo (ERR)

Tipo de Risco	Significado	Expressão
Excesso de Risco Relativo (ERR)	Aumento do risco relativo adicionado à radiação base	$ERR = RR - 1$
Risco Relativo (RR)	Razão entre a frequência do evento em dois grupos: expostos e não expostos	$RR = \text{Expostos} / \text{Não expostos}$

Assim, o ERR contabiliza um risco adicional associado diretamente a exposição à exposição, tomando como referência o risco base do grupo não exposto. Desse modo, um ERR igual a 0 indica que a exposição à radiação não exerceu efeito sobre a incidência de patologias, implicando em um risco relativo $RR = 1$. Por outro lado, um $ERR > 0$, denota um aumento de 100% no risco para o grupo exposto em comparação ao grupo de controle, resultando em um $RR > 1$. A Tabela 7 detalha a relação matemática entre o risco e a exposição para RR e ERR (74). A interpretação dos valores de excesso de risco é adotada mediante as variáveis de interesse como: idade de exposição, sexo, hábitos, predisposição genética e posição geográfica. Essa estratificação da população e dos dados estatísticos é fundamental para obter estimativas com maior acurácia e relevância estatística a respeito do risco de indução de cânceres radioinduzidos.

A propensão à leucemia, proveniente da exposição a doses de radiação, ilustra o método de avaliação proposto neste trabalho, de maneira semelhante a ação da SAR, para definir estratégias de enfrentamento a emergências nucleares. Para avaliar essa situação,

Tabela 7 – Valores para o Risco Relativo (74)

Excesso de Risco Relativo (ERR)	Risco Relativo (RR)
ERR < 0: não há excesso de risco relacionado à exposição à radiação.	RR = 1: não aumenta o risco de desenvolver alguma doença.
	RR > 1: exposição aumentada.
ERR > 1: o risco aumenta em 100%.	RR < 1: a exposição atua como fator protetor ou evidencia efeito hormético (75, 76).

são necessárias etapas que estimem valores mais realistas em cenários complexos, em especial naqueles de contaminação de extensas áreas urbanas.

2.7.2 Dose Letal Mediana ($LD_{50/30}$)

A caracterização dos efeitos biológicos conforme discutido em radioproteção divide-se em função da dose recebida pelos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e pelo público geral. Nos relatórios do comitê BEIR, as doses são categorizadas para fins de estimativa de riscos estocásticos (probabilísticos), como a indução de câncer. Sob essa perspectiva, o relatório BEIR VII define doses baixas como menores que 100 mSv. Por outro lado, as doses consideradas altas são iguais ou superiores a 100 mSv (77).

À medida que essas doses aumentam sobre o referencial, atingindo a escala de sieverts, a análise passa a ser sobre os efeitos teciduais agudos. Nessa faixa de extrema severidade, situa-se o parâmetro de dose letal $LD_{50/30}$ (72), um conceito que expressa a toxicologia aguda da radiação ionizante decorrente de efeitos adversos em curto período por dose única ou múltipla. A $LD_{50/30}$ é definida como a dose de radiação de corpo inteiro letal para causar o óbito de 50% da população em um intervalo de 30 dias, para humanos saudáveis. Na ausência de suporte médio e sob radiação de baixa transferência linear de energia (Low Linear Energy Transfer, Low LET), como em nosso estudo, o valor de $LD_{50/30}$ é estabelecido entre 3 e 5 Sv (16, 63, 72, 78). Nesse nível de exposição, a evolução do caso que pode levar à óbito é condicionada pela falência da função da medula óssea devido à síndrome hematopoiética manifestando-se por uma redução celular no tecido sanguíneo, acarretando a perda da imunidade e o aumento de hemorragias agudas (59, 79).

2.7.3 Modelos Epidemiológicos

Os relatórios do comitê BEIR (*Biological Effects of Ionizing Radiation*) V e VII quantificam o risco radiológico à saúde humana por meio de funções algébricas empíricas

ajustadas a dados epidemiológicos. Essas expressões matemáticas estimam o excesso de risco para o desenvolvimento de neoplasias malignas induzidas por radiação e constituem a base matemática para o cálculo da probabilidade de causalidade (PC). A PC é uma métrica utilizada para avaliar o diagnóstico de câncer em um indivíduo que tenha sido decorrente da dose de radiação absorvida por ele, com relação ao risco basal da população. Dessa forma, a aplicação desses modelos permite associar às análises epidemiológicas de efeitos estocásticos de longo prazo ao planejamento de estratégias de mitigação (medidas para reduzir, atenuar ou ainda limitar os impactos negativos e os danos causados por um acidente) e monitoramento da saúde da população.

As tomadas de decisão frente a emergências radiológicas e nucleares, utilizando os modelos, podem ser vistas em forma de camadas no espaço e no tempo. As equações permitem flexibilidade na avaliação do risco, com dependências em variáveis como sexo, idade e TEDE. Portanto elas fornecem uma estratégia de resposta que promove a otimização de recursos ao longo do tempo e o acompanhamento dos riscos àquela população exposta (80).

Os modelos para carcinogênese radioinduzida apresentados no documento BEIR V consideram exposições de baixo LET, em que a exposição de corpo inteiro se limita ao intervalo de doses $0, 1 \text{ Sv} < \text{TEDE} < 4 \text{ Sv}$. Dessa forma, as equações que preveem a ocorrência da leucemia, de interesse neste trabalho, em um período de latência em torno de 2,5 anos, são expressas utilizando o excesso de risco relativo (ERR) como referência. Das expressões utilizadas neste trabalho estão as Equações 2.18 e 2.21 (81).

$$r_0(a, s) \left[1 + (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \exp(\beta_1) \right], \quad e \leq 20, t \leq 15 \quad (2.18)$$

$$r_0(a, s) \left[1 + (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \exp(\beta_2) \right], \quad e \leq 20, 15 < t \leq 20 \quad (2.19)$$

$$r_0(a, s) \left[1 + (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \right], \quad e \leq 20, t > 25 \quad (2.20)$$

$$r_0(a, s) \left[1 + (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \exp(\beta_3) \right], \quad e > 20, t \leq 25 \quad (2.21)$$

$$r_0(a, s) \left[1 + (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \exp(\beta_4) \right], \quad e > 20, 25 < t \leq 30 \quad (2.22)$$

$$r_0(a, s) \left[1 + (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \right], \quad e > 20, t > 30 \quad (2.23)$$

Das Equações 2.18 a 2.23, D é a dose de radiação de corpo inteiro (TEDE), $r_0(a, s)$ a taxa básica para a idade (a) e sexo (s), e denota a idade da pessoa irradiada (em anos) no momento da exposição, os coeficientes α e β apresentados nas referidas expressões são listados na Tabela 8. De maneira clara, enfatiza-se que foi adotado o valor unitário para a taxa $r_0(a, s)$ (80, 81).

O modelo BEIR VII apresenta as estimativas de risco para o câncer radioinduzido,

Tabela 8 – Coeficientes das equações do modelo BEIR V

α_1	α_2	β_1	β_2	β_3	β_4
0,243 Sv ⁻¹	0,271 Sv ⁻¹	4,885	2,380	2,367	1,638

em razão da exposição a baixas doses de radiação ionizante, delimitadas aos intervalos de 1 mSv < TEDE < 100 mSv para radiações de baixa transferência linear de energia (menor deposição de energia) (17). O modelo BEIR V, utiliza metodologias para estimar os riscos de incidência e mortalidade por câncer, com as variáveis de dose, sexo e idade da pessoa irradiada no momento da exposição, de maneira semelhante a BEIR VII é expressa pela Equação 2.24

$$ERR(D, t, e, s) = \beta_s(D + \theta D^2) \exp \left[\gamma e^* + (\delta^* + \varphi e^*) \log \left(\frac{t}{25} \right) \right] \quad (2.24)$$

Na equação 2.24, o coeficiente β_s denota o risco relativo para o período de latência, idade e sexo, com valores de 1, 1/Sv ou 1, 2/Sv desde que a exposição ocorra para $e > 30$ e $e < 25$ (e é a idade em anos) para os sexos masculino e feminino, respectivamente. O e^* assume o valor nulo se a idade no período de exposição for maior que 30 anos, caso contrário, $e^* = 1$. Enquanto os coeficientes γ , θ , δ^* e ϕ admitem valores como $-0, 40/\text{década}$, $0, 87/\text{Sv}$, $-0, 48$ e $0, 42$ respectivamente (82).

A análise entre os modelos BEIR V e VII apresenta robustez científica, fundamentada nos dados do *Life Span Study* (LSS) dos sobreviventes das bombas atômicas, utilizados para quantificar os riscos radiológicos. Esses modelos destacam sexo, idade no momento da exposição e tempo de latência como fatores de risco para câncer radioinduzido. A divergência entre eles está no aprimoramento do sistema dosimétrico de DS86 (na BEIR V) para DS02 (BEIR VII) com estimativas mais refinadas e de risco conservador (17). Apesar desses avanços, ambos os modelos possuem limitações, como a incerteza estatística em doses inferiores a 100 mSv, onde o excesso de risco é difícil de distinguir das flutuações naturais do sistema.

2.8 Fundamentos dos Reatores Modulares de Pequeno Porte e Avaliação de Dispersão Radiológica em Cenários Urbanos

Em um cenário brasileiro, no qual os avanços do uso da energia nuclear se tornam cada vez mais presentes, as discussões sobre a implementação dos pequenos reatores modulares (*Small Modular Reactor* - SMRs) representam uma evolução do setor nuclear. Esses sistemas apresentam capacidades de até 300 MWe (megawatt elétrico), sendo projetados para construção ágil, maior facilidade no transporte, custos reduzidos e níveis

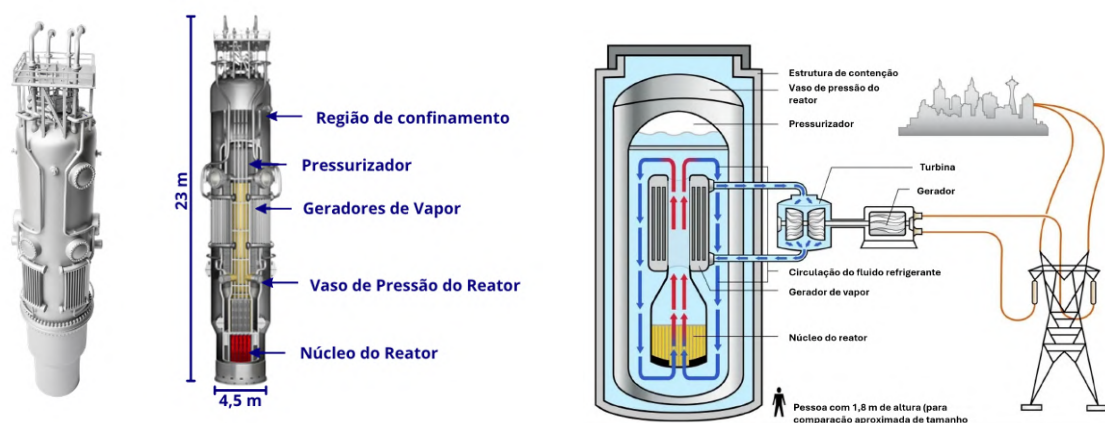
de segurança aprimorados, quando comparados aos reatores convencionais de grande porte, tradicionalmente associados a altíssimos investimentos e longo prazo de implementação (83).

Os SMRs utilizando tecnologias de água leve (*Light Water Reactor*, LWR), operam a partir de um sistema integrado no qual o núcleo do reator, os geradores de vapor e o pressurizador estão contidos em um único vaso de pressão, como destaca a Figura 5. Esse arranjo favorece a circulação natural do fluido refrigerante (água), eliminando a necessidade de bombas mecânicas e reduzindo a complexidade operacional. Como consequência, há um aumento da segurança intrínseca do sistema, uma vez que sua operação depende de fenômenos físicos passivos, como a convecção natural, permitindo a remoção de calor mesmo na ausência de intervenção humana ou fornecimento de energia (77).

A versatilidade dos reatores SMRs amplia suas possibilidades de aplicação, abrangendo desde regiões remotas até ambientes industriais e urbanos, sendo vistos como soluções para reduzir o impacto ambiental causados por outros tipos de tecnologias e diversificar a matriz energética, com baixa emissão de carbono, tema de grande destaque no país (77, 84, 85, 86, 87). Entre os modelos existentes de SMRs, destaca-se o NuScale Power Module (NPM), reconhecido como o primeiro pequeno reator aprovado pela Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos (*U. S. Nuclear Regulatory Commission* - NRC), em 2020. O sistema apresenta capacidade de geração de aproximadamente 77 MWe por módulo (com capacidade de expansão de até 12 módulos), massa estimada de 700 toneladas, de fácil transporte, e é alimentado por um reator de água leve, sendo adequado para demandas energéticas de alta confiabilidade, como unidades hospitalares. A Figura 5 apresenta uma visão geral do modelo NuScale, incluindo seu sistema de funcionamento e processo de conversão da energia nuclear em energia elétrica (83, 84, 88).

O Pequeno reator modular de água leve (LWR) ilustrado na Figura 5, integra os principais componentes do sistema em um único vaso de pressão com dimensões significativamente menores que os reatores convencionais, possuindo cerca de 23 m de altura por 4,5 m de diâmetro. O sistema atua em um ciclo térmico por convecção natural no ciclo primário, onde o calor proveniente das reações de fissão no interior do núcleo expande o fluido refrigerante (água) em direção ao pressurizador, garantindo que a água permaneça no estado líquido sob alta pressão. Esse calor é transferido para um segundo circuito onde o vapor superaquecido é gerado e direcionado para fora do confinamento, onde inicia o processo de conversão e transporte de energia (89, 83), que chegaria aos centros urbanos caso o sistema fosse implantado. O movimento rotacional do vapor para as turbinas converte energia térmica em energia cinética, acionando diretamente o gerador, operando no princípio da indução eletromagnética, que transforma a energia mecânica em elétrica, enviada em alta tensão pelas linhas de transmissão. Para alcançar centros urbanos, a voltagem é reduzida por transformadores de distribuição a níveis seguros (77).

Figura 5 – Modelo de reator NuScale e processo de conversão de energias



Fonte: Adaptado (83, 77)

Apesar das vantagens tecnológicas, a operação de reatores nucleares envolve riscos que, embora reduzidos, não podem ser desconsiderados. Em particular, cenários de liberação de radionuclídeos, como césio-137, exigem análises detalhadas que considerem variáveis como condições meteorológicas, densidade populacional e infraestrutura de resposta. As análises possibilitam definir, elementos fundamentais para a compreensão dos possíveis impactos à saúde pública, especialmente em situações de exposição prolongada.

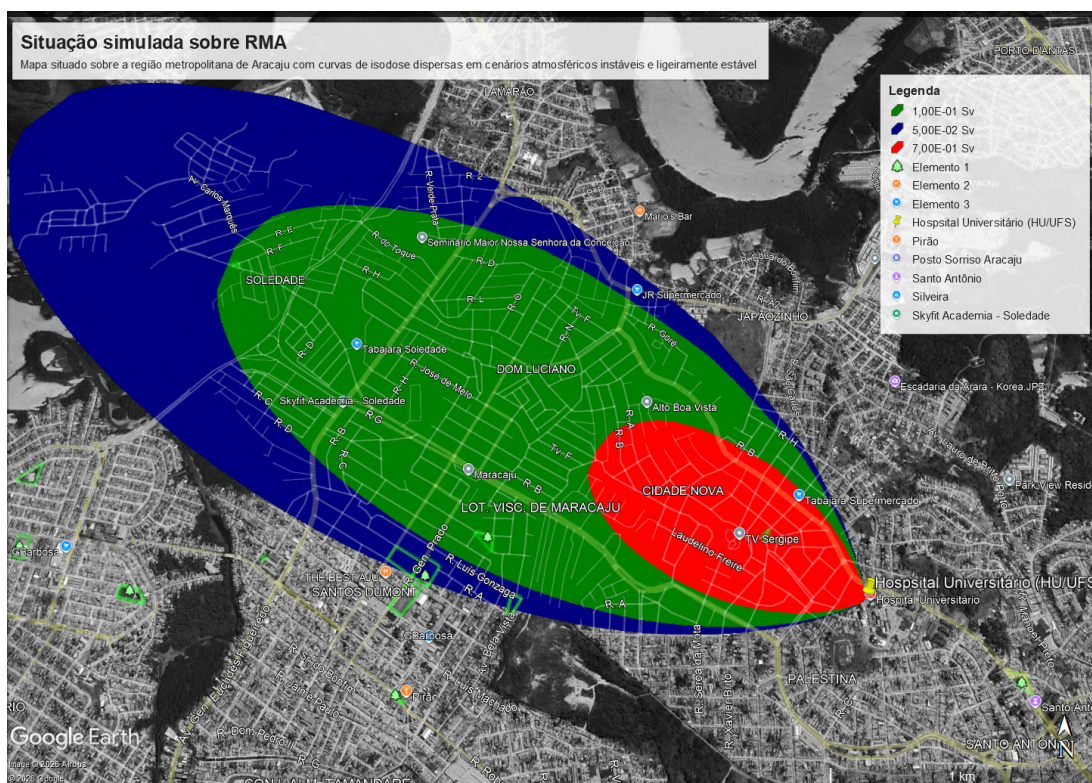
As condições meteorológicas e geográficas do município de Aracaju favorecem a dispersão atmosférica de poluentes, devido à proximidade com o litoral. A associação da predominância de ventos regionais, à dinâmica climática da cidade e do relevo predominantemente plano, contribui para a propagação de contaminantes em escala local e regional, conforme destacado na Figura 14, na qual as doses extrapolam o raio de 10 km (área de interesse e limite suportado pelo código HotSpot), o que possibilita um cenário relevante para estudos de dispersão de radionuclídeos.

Do ponto de vista da modelagem física, os modelos gaussianos são amplamente utilizados na literatura para a descrição da dispersão de poluentes, são adequados para ambientes urbanos, destacando também o comportamento da pluma, fortemente condicionado pelas variáveis meteorológicas, como as da capital sergipana (90). A direção e a intensidade do vento desempenham um papel central no transporte de poluentes, determinando, assim, a orientação preferencial de dispersão e a taxa de diluição das concentrações atmosféricas. A análise dos impactos de um evento incorporados aos dados demográficos permite estimar a vulnerabilidade da população exposta. Nesse contexto, os dados censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) fornecem uma base essencial para a caracterização da cidade de interesse.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na construção de um cenário hipotético de acidente nuclear, no qual são integrados a tipologia do reator, as informações meteorológicas e as características demográficas da região de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro. Esta abordagem permite avaliar, sistematicamente, a dispersão de contaminantes radioativos e obter estimativas de dose (TEDE) em função da distância e do tempo de exposição, fornecendo subsídios para a discussão de aspectos físicos, sociais e sanitários do incidente. A Figura 6 apresenta o mapa projetado sobre a região de interesse, exemplificando a integração geoespacial proposta.

Figura 6 – Mapa de isodoses sobre o cenário instável e ligeiramente estável de recorte da região metropolitana de Aracaju



Fonte: Autora

A hipótese central deste trabalho consiste na integração entre a modelagem gaussiana de transporte atmosférico e o geoprocessamento de dados censitários, para uma identificação mais precisa de grupos vulneráveis (crianças e idosos) em tempo hábil para a defesa civil, superando a análise puramente dosimétrica. Essa proposta busca responder ao problema de rapidez na tomada de decisão durante as primeiras 100 horas de uma emergência, conforme estabelecido pelas normas da IAEA GSR Part 7 (4).

Esta estrutura metodológica fundamenta-se na premissa de que a resposta a

emergências radiológicas em centros urbanos exige um equilíbrio entre precisão técnica e agilidade operacional. Para tanto, assume-se como hipótese a dispersão em terreno com rugosidade urbana homogênea e a ausência de precipitação (deposição úmida), configurando um cenário de máxima exposição. As escolhas pelo código HotSpot v. 3.1.2 e pelo software QGIS justificam-se pela capacidade dessas ferramentas de transformar estimativas teóricas de pluma em indicadores demográficos reais, garantindo a reprodutibilidade e a robustez necessárias para o planejamento de zonas de ação preventiva (PAZ).

3.1 Ferramentas utilizadas no trabalho

A modelagem da dispersão atmosférica de radionuclídeos constitui a etapa central na avaliação das consequências radiológicas decorrentes de liberações acidentais. Para este estudo, adotou-se o código computacional HotSpot *Health Physics Code*, versão 3.1.2, desenvolvido pelo *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL). O HotSpot é amplamente reconhecido como uma ferramenta de análise preliminar para cenários de emergência radiológica, projetada para fornecer estimativas conservadoras de dose e de contaminação ambiental em liberações de curto alcance e curta duração (23).

O modelo é particularmente indicado para eventos com alcance máximo aproximado de 10 km, duração inferior a 24 horas e condições meteorológicas simplificadas, podendo ser aplicado tanto a cenários urbanos quanto a rurais. As simulações baseiam-se no modelo de dispersão por pluma atmosférica (*Gaussian plume model*), oferecendo suporte a análises emergenciais voltadas à proteção ambiental e à segurança de indivíduos potencialmente expostos, conforme descrito por Homann (23).

O software disponibiliza parâmetros ajustáveis que permitem a construção de diferentes cenários de liberação radiológica. Entre os modelos de dispersão disponíveis, destacam-se: pluma geral (modelo adotado neste trabalho), explosão, incêndio e ressuspensão. As variáveis meteorológicas incluem velocidade do vento e classe de estabilidade atmosférica segundo o sistema de F. Pasquill e F. B. Gifford (classes de Pasquill-Gifford) (23).

Adicionalmente, o programa permite a definição da atividade do radionuclídeo, do tempo de observação da pluma radioativa e da inserção de pontos específicos de avaliação de dose (receptores, entende-se por receptores um ou mais indivíduos), possibilitando o cálculo da dose associada à concentração do radionuclídeo em alturas e coordenadas determinadas.

O radionuclídeo Cs-137, quando liberado na atmosfera, apresenta elevada capacidade de dispersão e mistura com o ar ambiente, principalmente na forma de aerossol. Tal comportamento decorre da associação do radionuclídeo a materiais particulados (MPs), que interagem e se distribuem entre os principais constituintes atmosféricos - nitrogênio,

oxigênio, argônio e dióxido de carbono. A incorporação de parâmetros como direção e velocidade do vento, bem como a estabilidade atmosférica, permite modelar adequadamente o transporte desses aerossóis radioativos e estimar a extensão espacial do evento.

Os cálculos de dose realizados neste estudo consideraram os principais mecanismos físicos envolvidos na dispersão atmosférica: advecção, difusão turbulenta e processos de remoção, incluindo deposição seca, deposição úmida e decaimento radioativo. Essas condições permitem avaliar tanto a exposição por submersão na pluma quanto a possibilidade de inalação do Cs-137, além de contemplar processos posteriores de ressuspensão. Os resultados obtidos evidenciam que as concentrações e as doses estimadas variam significativamente em função da distância na direção predominante do vento, o que reflete a dinâmica da dispersão atmosférica.

No cenário proposto, estabeleceu-se uma janela temporal de resposta de quatro dias, compatível com análises de curto prazo descritas na literatura. Nesse intervalo, foi possível avaliar a evolução espacial da contaminação e estimar as áreas potencialmente afetadas. A delimitação das regiões contaminadas foi realizada com base nas distribuições de dose projetadas ao longo da pluma radioativa, considerando diferentes níveis de exposição.

Para fins de classificação das zonas de impacto radiológico, adotou-se valores de referência amplamente utilizados em planejamento de resposta a emergências nucleares: níveis elevados de dose efetiva (≈ 700 mSv), associados à possibilidade de efeitos determinísticos; níveis intermediários (≈ 100 mSv), que demandam ações emergenciais e níveis externos (≈ 50 mSv), que podem justificar medidas de proteção como evacuação preventiva, conforme diretrizes internacionais de proteção radiológica (91, 4).

O HotSpot incorpora relatórios federais norte-americanos de orientação, dentre os quais se destaca o *Federal Guidance Report No. 11* (FGR-11), publicado pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (92). Esse relatório fornece fatores de conversão de dose (*Dose Conversion Factors* - DCFs) para diferentes vias de exposição, incluindo inalação, submersão na pluma e irradiação pelo solo contaminado (*ground shine*).

Os DCFs podem ser aplicados tanto em exposições agudas (1, 4 e 30 dias) quanto em exposições prolongadas. Em casos de exposições agudas, o modelo permite estimar potenciais efeitos determinísticos associados a doses elevadas de radiação em curto intervalo de tempo, considerando órgãos-alvo específicos, como pulmões e medula óssea vermelha. Essa abordagem permite avaliar o impacto radiológico imediato e subsidiar decisões relacionadas à proteção da população.

Os coeficientes de dose para um período de 50 anos decorrentes de inalação, expressos como *50-year Committed Effective Dose Equivalent* (50-yr CEDE), permitem estimar os efeitos decorrentes da incorporação aguda de diferentes radionuclídeos, incluindo a avaliação de possíveis efeitos determinísticos em órgãos-alvo, a destacar pulmões, parede

do intestino delgado, medula óssea e tireoide (92). A partir dos dados inseridos no software, é possível aplicar os DCFs às diferentes vias de exposição consideradas na modelagem citada anteriormente. O diâmetro aerodinâmico médio adotado para as partículas de poeira radioativa foi de 1 micrômetro (μm), valor que caracteriza partículas respiráveis e está em conformidade com os parâmetros usualmente empregados em modelos de avaliação de risco por inalação. O termo 50-yr CEDE refere-se, portanto, à dose efetiva comprometida resultante de um único evento de inalação, integrada ao longo de 50 anos após a incorporação.

A Figura 13 apresenta a identificação do radionuclídeo considerado na simulação: o céσιο-137, isótopo selecionado. A classificação “Classe D” refere-se à *Lung Clearance Class*, conforme definida nos modelos biocinéticos da *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), indicando que o material possui rápida depuração pulmonar, com tempo de permanência da ordem de dias. Em contraste, a antiga Classe Y corresponde a materiais de depuração lenta, cuja retenção pode se estender por anos, favorecendo maior irradiação localizada no pulmão. No caso do Cs-137 na Classe D, sua elevada solubilidade implica transferência relativamente rápida do pulmão para a corrente sanguínea após a inalação. O radionuclídeo apresenta meia-vida física (*physical half-life*) de aproximadamente 30 anos, fator que contribui para sua persistência ambiental e relevância em análises de impacto radiológico.

A adoção do FGR-11 (92) no software se justifica pela consolidação dos coeficientes de dose comprometida para a inalação e ingestão, com base nos modelos biocinéticos e dosimétricos estabelecidos pela ICRP30, e expressam a dose equivalente integrada ao longo de 50 anos. Complementarmente, o FGR-12 foi considerado para a estimativa de doses externas, expressas como doses por unidade de exposição integrada no tempo, aplicáveis à exposição a radionuclídeos presentes no ar, na água ou depositados no solo (93). Esses relatórios asseguram consistência metodológica com os padrões internacionais de proteção radiológica.

No que se refere à análise meteorológica, o código permite importar arquivos sequenciais com até cinco anos de dados horários, construindo uma *Joint Frequency Distribution* (JFD), ou Distribuição de Frequência Conjunta, que combina velocidade do vento, direção e classe de estabilidade atmosférica, totalizando aproximadamente 43.800 observações. Com base nessa distribuição intermediária, o software calcula a distribuição de frequência cumulativa ordenada e determina os valores percentis de dose correspondentes. Com o objetivo de evitar a descontinuidade na distribuição cumulativa relacionada à discrição dos nove grupos de velocidades dos ventos, os valores empregados nos cálculos foram sorteados aleatoriamente dentro dos limites de cada classe, permitindo uma transição mais suave entre os intervalos considerados.

O modelo meteorológico histórico empregado está organizado em 16 setores direcio-

nais de vento e considera, adicionalmente, 16 setores independentes da direção, permitindo análises tanto dependentes quanto independentes do eixo predominante da pluma. Os percentis padrão disponibilizados pelo software incluem 50º, 90º, 95º, 99º e 99,5º, podendo ser ajustados manualmente no intervalo entre 50º e 100º, conforme a necessidade da análise.

Considerando que a metodologia JFD utiliza nove grupos de velocidade do vento, 16 setores direcionais e sete classes de estabilidade atmosférica (A a G), o conjunto inicial de 8.241 observações meteorológicas gerados pelo código HotSpot foi reagrupado em 1.008 combinações representativas. Essa escolha reduz significativamente o número de cálculos individuais de dose, otimizando o tempo de computação sem comprometer a representatividade estatística dos resultados. A saída final da metodologia inclui os grupos de velocidade do vento associados aos respectivos percentis de dose, permitindo caracterizar a probabilidade de impacto radiológico no cenário analisado.

Para a correta interpretação das simulações, é fundamental explicitar que o uso do código HotSpot v. 3.1.2 possui um domínio de validade específico, sendo recomendado prioritariamente para eventos de até 10 km e duração padrão de liberação em 10 minutos (23). Como limitação metodológica relacionada aos modelos gaussianos, o software não processa as interações da pluma com a morfologia urbana complexa, tratando a cidade por meio de uma rugosidade superficial generalizada. Embora as análises resultem em uma maior margem de erro em comparação a modelos como os de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), o código fornece estimativas conservadoras que priorizam tendências de proteção pública em razão de exatidão determinística.

3.2 Uso do HotSpot Health Physics Code

Com base na radiotoxicidade e possíveis danos à saúde humana, o inventário da pluma radioativa apresentado na Tabela 10 representa o conjunto de radionuclídeos cujas massas e atividades variam conforme o decaimento radioativo de um SMR semelhante ao LWR da NuScale após dois anos de operação (91). A Tabela 9 apresenta um resumo das hipóteses assumidas no trabalho. A Tabela 11, por sua vez, apresenta, em síntese, a atividade total liberada pela planta nuclear, o termo-fonte adotado para a modelagem, a direção do vento e as classes atmosféricas para a estimativa das doses radiológicas associadas ao evento.

Tabela 9 – Resumo das características da modelagem da pluma

Modelo de Pluma	de Terreno	Processos Físicos	Termo-Fonte
Distribuição Gaussiana	Rugosidade urbana, sem modelagem individual de edifícios	Ausência de deposição úmida	Liberação instantânea de curta duração

Tabela 10 – Inventário do SMR simulado após 2 anos de operação

Radionuclídeo	Massa (g)	Atividade (Bq)
Ba-140	$3,409 \times 10^1$	$9,228 \times 10^{16}$
Cs-137	$1,337 \times 10^3$	$4,295 \times 10^{15}$
I-131	$1,032 \times 10^1$	$4,746 \times 10^{16}$
I-135	$7,453 \times 10^{-1}$	$9,744 \times 10^{16}$
Kr-85	$4,252 \times 10^1$	$6,153 \times 10^{14}$
Kr-85m	$5,700 \times 10^{-2}$	$1,735 \times 10^{16}$
Rn-218	$5,137 \times 10^{-19}$	$2,811 \times 10^4$
Rn-219	$1,613 \times 10^{-17}$	$7,766 \times 10^3$
Rn-220	$6,839 \times 10^{-13}$	$2,334 \times 10^7$
Rn-222	$1,327 \times 10^{-14}$	$7,553 \times 10^1$
Sr-89	$5,757 \times 10^1$	$6,185 \times 10^{16}$
Sr-90	$7,325 \times 10^2$	$3,739 \times 10^{15}$
Te-132	$6,049 \times 10^0$	$6,911 \times 10^{16}$
Xe-133	$1,443 \times 10^1$	$1,000 \times 10^{17}$
Xe-133m	$7,293 \times 10^{-2}$	$1,210 \times 10^{15}$
Xe-135	$4,998 \times 10^{-1}$	$4,697 \times 10^{16}$
Xe-135m	$4,102 \times 10^{-3}$	$1,383 \times 10^{16}$

Fonte: Adaptado de (94)

Além do arcabouço computacional propriamente dito, o software requer a inserção de parâmetros fundamentais para o cálculo da concentração atmosférica de Cs-137 e da dose radiológica associada. Para a estimativa da depleção da pluma do material radioativo, adotou-se uma velocidade padrão de deposição de 3 m/s para partículas respiráveis, considerando aerossóis com diâmetro aerodinâmico médio (AMAD) de 1 μm , típicos da dispersão de material particulado em acidentes envolvendo reatores nucleares. Esse intervalo granulométrico é particularmente relevante, pois favorece tanto a permanência temporária na atmosfera quanto a contribuição significativa para as doses por inalação (71).

Adicionalmente, foi considerada uma taxa de respiração de $3,34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, compatível com valores de referência empregados em avaliações de exposição ocupacional e ambiental (22). Ressalta-se que todos esses parâmetros são inseridos manualmente no software e podem ser ajustados conforme as características específicas do cenário analisado.

Dessa forma, a altura do receptor (h) foi fixada em 1,5 m, valor representativo da zona respiratória humana. Assume-se que essa altura corresponda, de forma aproximada, à posição média de órgãos considerados mais radiosensíveis no corpo humano, especialmente em avaliações de exposição externa e por inalação (39). A Tabela 11 reúne os principais

parâmetros de entrada empregados no código HotSpot, sintetizando as condições adotadas para a modelagem da dispersão atmosférica e a estimativa das doses.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada para a simulação no HotSpot

Comandos	Valores
Termo-fonte	^{137}Cs ($2,80 \times 10^{17}$ Bq) (3)
Altura efetiva	10 m
Velocidade do vento ($h = 10$ m)	3,0 m/s
Classe de estabilidade	A até F (Pasquill-Gifford)
Altura do receptor	1,5 m
Coordenadas	Pluma centralizada
Cenário	Urbano

Com base nos parâmetros anteriormente estabelecidos, foram realizadas simulações considerando a liberação atmosférica de radionuclídeos em diferentes períodos do dia, contemplando condições diurnas e noturnas, na ausência de precipitação. Essa abordagem permitiu avaliar o comportamento da pluma sob distintas condições de estabilidade atmosférica, incluindo a Classe F de Pasquill-Gifford, caracterizada como moderadamente estável.

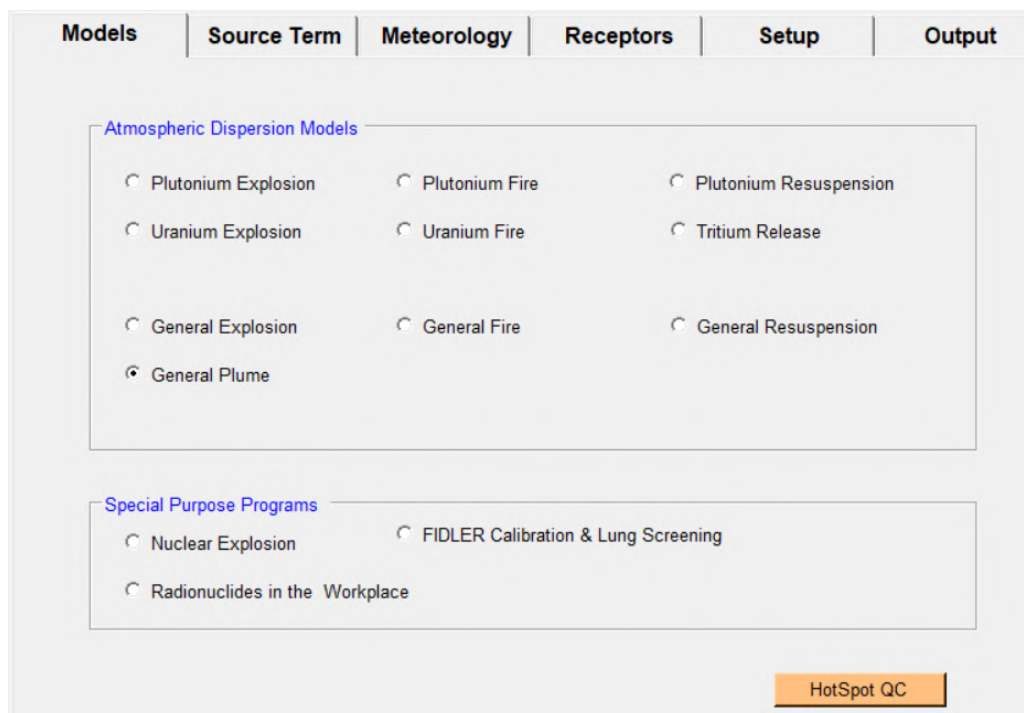
Considerou-se uma altura efetiva de liberação (H) de 10 m, valor consistente com referências técnicas aplicáveis a instalações desse porte e compatível com cenários de emissões acidentais próximas ao nível do solo (91). Foram incluídas as classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford de A à F, abrangendo desde condições fortemente instáveis até moderadamente estáveis, a fim de avaliar a sensibilidade da dispersão do Cs-137 às variações micrometeorológicas. Como condição direcional, estabeleceu-se vento proveniente de 120° (quadrante leste-sudeste) no momento do acidente, definindo o eixo preferencial de deslocamento da pluma. A escala temporal analisada, da ordem de algumas horas, corresponde à fase inicial do evento, período crítico para a estimativa das concentrações máximas ao nível do solo e para a avaliação dos impactos radiológicos imediatos à população potencialmente exposta.

A liberação na planta nuclear foi modelada assumindo que o cézio foi emitido para a atmosfera na forma de material particulado (MP), com atividade λ (Bq), caracterizando um termo-fonte instantâneo de curta duração. O tempo total de liberação foi fixado em 10 minutos, considerando um raio de análise de até 10 km a partir da fonte. Esse intervalo representa a duração típica da fase inicial de incidentes nucleares e corresponde ao período crítico para a avaliação dos primeiros impactos radiológicos decorrentes da dispersão atmosférica (63).

Na primeira janela do software, seleciona-se o cenário de liberação do tipo *General Plume*, conforme ilustrado na Figura 7, por representar uma abordagem mais conservadora ao modo do Centro Nacional de Alerta sobre Liberação Atmosférica (*National Atmosphe-*

ric Release Advisory Center-NARAC, centro de apoio e recursos para planejamento de emergências, avaliação, resposta a emergências e estudos sobre liberações atmosféricas de materiais nucleares, radiológicos, químicos, biológicos e naturais perigosos). Essa escolha implica o uso do modelo gaussiano clássico de dispersão, adequado para estimativas preliminares e análises de segurança, com ênfase em cenários de maior abrangência espacial.

Figura 7 – Janela inicial do HotSpot



Fonte: Autora

Optou-se pelo cenário urbano, o que altera os parâmetros iniciais do código devido às características específicas da superfície. Em ambientes urbanos, a maior rugosidade e a intensificação da turbulência atmosférica influenciam diretamente os coeficientes de dispersão, especialmente o vertical (σ_z), promovendo maior mistura e diluição da pluma quando comparado ao cenário rural. Essas diferenças impactam a geometria da pluma e, consequentemente, a distribuição espacial das concentrações e das doses estimadas.

Na segunda janela do software, denominada *Source Term* (Figura 8), define-se o radionuclídeo de interesse e os principais parâmetros associados ao termo-fonte. Entre eles, destaca-se o Material em Risco (*Material at Risk* - MAR), que corresponde à quantidade total de Cs-137 disponível para liberação; a Razão de Dano (*Damage Ratio* - DR), que indica a fração do MAR efetivamente afetada pelo evento acidental; a Fração de Liberação Aerotransportada (*Airborne Release Fraction* - ARF), que representa a parcela do material que se converte em aerossol ao ser liberada para a atmosfera; a Fração Respirável (*Respirable Fraction* - RF), definida pela proporção do aerossol com dimensões passíveis de inalação e o Fator de Fuga (*Leak Path Factor* - LPF), expressando a fração do material que, após

considerados os mecanismos de retenção e filtração, efetivamente atinge o meio externo.

Figura 8 – Janela do termo fonte no código HotSpot

Fonte: Autora

Mantém-se, conforme estabelecido anteriormente, o diâmetro aerodinâmico médio de $1 \mu m$ para o material particulado, parâmetro já adotado na modelagem da depleção da pluma e na estimativa das doses por inalação. A inserção conjunta desses dados no HotSpot permite o cálculo dos coeficientes de dispersão horizontal e vertical, que, em função do cenário considerado, influenciam diretamente a geometria e a extensão espacial da pluma. As Tabelas 3 e 4 (Seção 2) apresentam esses coeficientes para os cenários urbano e rural, evidenciando as diferenças decorrentes das condições de rugosidade superficial e turbulência atmosférica.

Na aba *Meteorology* (Figura 9), inserem-se os parâmetros meteorológicos necessários para a modelagem da dispersão atmosférica, incluindo a velocidade do vento (m/s), a direção do vento (expressa em graus) e as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (PG). Alternativamente, o software permite a utilização da opção baseada em radiação solar, na qual a informação de insolação substitui a definição manual da estabilidade atmosférica, uma vez que o próprio sistema determina automaticamente a classe de estabilidade correspondente com base nas condições atmosféricas informadas.

De maneira análoga, no campo *Receptors*, o HotSpot possibilita a definição dos pontos de interesse para o cálculo das doses associadas à dispersão do Cs-137 ao longo

Figura 9 – Janela da meteorologia visualizada no código

Fonte: Autora

da direção preferencial do vento. Nessa etapa, estabelecem-se as posições nas quais serão estimadas as concentrações atmosféricas e as doses correspondentes, considerando a altura do receptor fixada em 1,5 m, conforme previamente justificado como representativa da zona respiratória humana e compatível com a localização média de órgãos radiosensíveis (71).

As colunas apresentadas na Figura 10 permitem a inserção das distâncias, em quilômetros, para diferentes pontos de detecção ao longo do eixo da pluma. Nesta pesquisa, foram definidos 11 receptores distribuídos entre 0,5 km e 10 km da fonte emissora, o que possibilitou a análise da variação espacial das concentrações e das doses ao longo do gradiente de dispersão atmosférica.

Na janela Setup (Figura 11) estão os parâmetros complementares indispensáveis à execução das simulações, como o tipo de cenário adotado, o tempo de análise, as unidades radiológicas utilizadas, a geometria da fonte, bem como as opções relacionadas à deposição úmida e à deposição não respirável. Nessa etapa, também é selecionada a biblioteca de Fatores de Conversão de Dose, fração respirável considerada no cálculo e as curvas associadas à estimativa da TEDE (Total Effective Dose Equivalent).

Neste estudo, as isodoses geradas a partir das plumas gaussianas foram delimitadas nos níveis de 700, 100 e 50 mSv, com o objetivo de destacar faixas de relevância para

Figura 10 – Janela dos receptores

Fonte: Autora

a avaliação do impacto radiológico e possíveis níveis de intervenção. Ressalta-se, ainda, que os fatores relacionados à deposição no solo e à ressuspensão do material particulado são inseridos manualmente, permitindo ajustes conforme as características específicas do cenário analisado.

No comando Output apresentado na Figura 12 são gerados os arquivos de saída em formato (.txt), contendo os resultados correspondentes a todos os parâmetros previamente inseridos. Esses arquivos apresentam, em estrutura tabular, a TEDE discriminada por órgão, por meio da opção *Include All Organ Data*, bem como as contribuições específicas das diferentes vias de exposição como inalação, submersão na nuvem, ressuspensão e radiação proveniente do solo (*ground shine*), disponíveis na opção *Display All TEDE Components*.

Adicionalmente, o relatório inclui os tempos estimados de chegada da pluma aos diferentes receptores, as doses calculadas para cada distância considerada e os dados necessários à construção dos gráficos de isodose (*Contour Plots*), possibilitando a análise detalhada da distribuição espacial do impacto radiológico.

O software permite ainda a exportação de dados externos, como arquivos no formato (.KML), possibilitando a visualização georreferenciada dos resultados em software ou sites de mapeamento, bem como recursos de integração com sistema de posicionamento global

Figura 11 – Janela de setup geral visualizada no HotSpot

The screenshot shows the 'Setup' tab of the HotSpot software interface. The window has a menu bar with 'File' and 'Help'. The 'Setup' tab is active, displaying several configuration sections:

- Models:** Includes 'Terrain' (Standard/Rural/Conservative, City/Metropolitan Area), 'Wind Input Height', 'Explosion Model ARF Distribution', 'Ground Shine & Resuspension', and 'Contours' (TEDE (Sv) and Deposition (kBq/m2) for Inner, Middle, and Outer areas).
- Source Term:** Includes 'Sample Time' and 'Source Geometry' (Simple, Complex).
- Meteorology:** Includes 'Mixing Layer' (Enable Inversion) and 'Holdup Time'.
- Receptors:** Includes 'Radiological Units' (Classic, SI) and 'Distance Units' (Metric, English).
- Setup:** Includes 'Non-respirable Deposition Velocity', 'Wet Deposition' (Enable Rainout), 'DCF Library' (FGR 11, FGR 13, Acute (30-days)), and 'Breathing Rate'.
- Output:** Includes 'Color Options'.

Fonte: Autora

Figura 12 – Janela de output no código HotSpot

The screenshot shows the 'Output' tab of the HotSpot software interface. The window has a menu bar with 'File' and 'Help'. The 'Output' tab is active, displaying several output options:

- Text Files:** Includes 'Table Output', 'Save Table Output', and 'View Saved Table Output Files'. It also has checkboxes for 'Plume Centerline', 'Compass', 'Display All TEDE Components', 'Include All Organ Data', 'Include Organs Exceeding 0.5 Sv', and 'Append QC Data'.
- Contour Plots - Computer Display:** Includes 'TEDE Plot' and 'Ground Deposition Contour Plot'. It also has checkboxes for 'Plume Centerline' and 'Compass'.
- Plume Centerline Plots:** Includes 'TEDE Graph' and 'Ground Deposition Graph'.
- Contour Textual Output (.PLM files):** Includes 'TEDE Contours File' and 'Deposition Contours'. It also has checkboxes for 'Degrees - (Lat, Lon)' and 'Meters - (x,y)'.
- Google (.KML) Output:** Includes 'TEDE Contours File' and 'Deposition Contours'. It also has a 'Contour Options' button.
- Hotspot Mapping:** Includes a 'HotSpot' logo.
- Site Met Data:** Includes a 'Site Met Data' button.

Fonte: Autora

(GPS) para análise regional baseada em pontos monitorados por dosímetros. Além disso, é possível gerar um resumo completo do cenário simulado no formato (*.PLM*), reunindo as principais configurações e resultados da modelagem.

O comando *Site Met Data* possibilita a conversão de séries meteorológicas anuais com dados horários (8.760 registros por ano) em uma *Joint Frequency Distribution* (JFD). Essa análise organiza as observações em nove grupos de velocidade do vento, distribuídas ao longo de 16 setores direcionais, podendo considerar dependência ou independência da direção do vento.

No que se refere à dosimetria empregada, os cálculos de dose realizados pelo HotSpot baseiam-se nos Fatores de Conversão de Dose (DFCs) previamente descritos, fundamentados em relatórios federais de orientação. Esses coeficientes permitem a conversão das concentrações atmosféricas estimadas pelo modelo gaussiano em valores de dose efetiva e equivalente por diferentes vias de exposição.

Dessa forma, a integração entre a modelagem de dispersão atmosférica, o tratamento estatístico dos dados meteorológicos e a aplicação de coeficientes dosimétricos consolidados confere robustez técnica às simulações desenvolvidas. O conjunto metodológico adotado possibilita uma avaliação consistente do comportamento da pluma de Cs-137 e dos impactos radiológicos associados, o que encerra a estrutura de modelagem empregada nesta pesquisa.

A Figura 13 apresenta a interface da Biblioteca de Radionuclídeos (*Radionuclides in the Workplace*) do software, ambiente no qual são disponibilizados os DFCs para diferentes vias de exposição e órgãos-alvo. Nessa seção, a partir da seleção do radionuclídeo de interesse, é possível acessar seus respectivos coeficientes, organizados conforme os modelos e recomendações radiológicas adotados pelo programa.

Na biblioteca, observa-se a estrutura da base de dados que fundamenta os cálculos do software. Trata-se da parte mais importante da ferramenta, pois é nessa biblioteca que estão armazenados os coeficientes que convertem atividade incorporada (em becquerel) em dose efetiva ou dose equivalente (em sievert).

O título “*Inhalation Dose Conversion Factors* (sievert/becquerel)” esclarece diretamente a finalidade desses dados: determinar, para cada 1 becquerel (Bq) de um determinado radionuclídeo inalado, a dose recebida por cada órgão ou tecido do corpo humano, expressa em sievert (Sv). Esses fatores constituem a base dos cálculos de dose por inalação realizados nas simulações, garantindo a consistência com os modelos biocinéticos e os critérios radiológicos internacionais adotados pelo software.

Figura 13 – Biblioteca de radionuclídeos visualizada no HotSpot após a seleção do radionuclídeo Cs-137

Radionuclide **Cesium**

Cs-137 D 30.0y

View Inhalation DCFs View Submersion DCFs View Ground Shine DCFs

Return

FGR 11/12 DCF values. ICRP series 30.

Inhalation Dose Conversion Factors (sievert / becquerel)

R Marrow	ULI Wall	Adrenals
Lung	LLI Wall	Skin
SI Wall	Kidneys	Spleen
Thyroid	Liver	Testes
Breast	Bld Wall	Thymus
Esophagus	Muscle	Brain
St Wall	Ovaries	Uterus
B Surface	Pancreas	

SI Classic One micron AMAD 50-yr CEDE

Fonte: Autora

3.3 Sistema de Informações Geográficas

A delimitação das isodoses de 50 mSv, 100 mSv e 700 mSv foi estabelecida com base em critérios técnicos amplamente utilizados na proteção radiológica para caracterização de cenários de emergência, sendo representadas por zonas externas, medianas e internas, respectivamente. A escolha desses valores buscou permitir a diferenciação espacial das áreas impactadas nos primeiros quatro dias após a liberação.

De acordo com relatórios da ICRP e da IAEA (*International Atomic Energy Agency*), os níveis de 50 mSv e 100 mSv situam-se dentro do intervalo usualmente considerado para exposições do público em situações emergenciais, em que a definição da região abrangida pela isodose de 50 mSv possibilita concentrar as medidas de monitoramento e orientação à população para minimizar a exposição, visando garantir a sua segurança. A isodose de 100 mSv foi identificada como uma região de maior relevância radiológica, compatível com a adoção de intervenções mais imediatas, como abrigo ou evacuação (59, 95, 4).

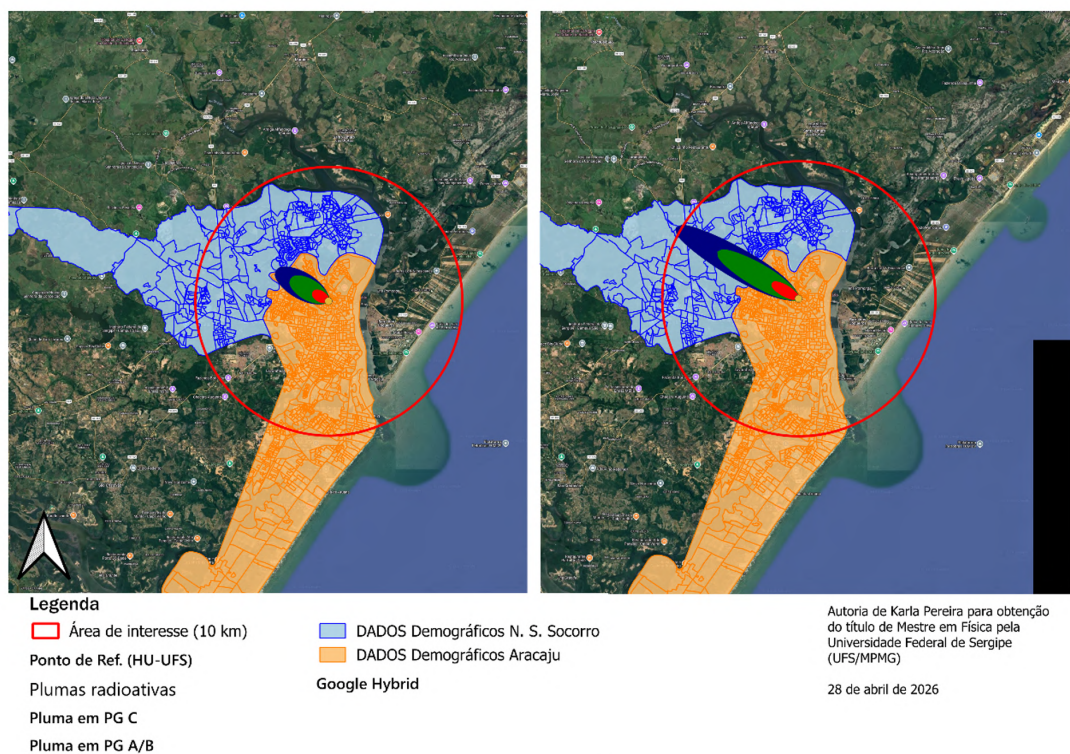
O valor de 700 mSv foi adotado para representar a zona interna de maior exposição. Essa condição encontra-se na ordem de grandeza associada a exposições agudas capazes de produzir alterações biológicas clinicamente detectáveis (96). Ainda que a manifestação de efeitos determinísticos dependa de outros fatores como taxa de dose e a uniformidade da exposição, a utilização da isodose permite destacar a região com maior potencial de

comprometimento à saúde em um cenário de altíssima exposição a curto prazo.

Para cada classe PG, foram gerados arquivos no formato (.KMZ), possibilitando a integração direta das áreas de isodose ao ambiente de Sistema de Informação Geográfica (GIS) por meio do software QGIS. Essa etapa permitiu que os resultados do cenário hipotético assegurassem a coerência cartográfica entre as simulações de dispersão atmosférica e a base territorial da região analisada.

As estimativas censitárias projetadas por meio do complemento no próprio QGIS versão 3.44.8 denominada Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Censo, considerou a população total dos municípios de Aracaju (AJU) e Nossa Senhora do Socorro (NSS), abrangendo indivíduos de ambos os sexos e todas as faixas etárias (0 a +70 anos), além da demografia das duas cidades nas Classes de PG A/B e C. Como resultado, foram gerados dados físicos de dispersão e deposição radioativa em indicadores quantitativos de possível impacto humano, fornecendo subsídios técnicos para análises de planejamento e gestão de emergências nas regiões de AJU e NSS, a Figura 14 apresenta as áreas selecionadas.

Figura 14 – Curvas sobre o recorte do mapa de Sergipe (evidenciando os municípios de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro) sobre as Classes de PG A/B e C respectivamente



Fonte: Autora

Deve-se destacar que o HotSpot não incorpora, de forma detalhada, as interações específicas entre a pluma radioativa e a morfologia urbana. O código considera apenas

a rugosidade superficial generalizada, dessa forma não apresenta de maneira explícita a geometria das construções ou, a complexidade do conjunto de elementos que formam a estrutura física e funcional de uma cidade (tecido urbano), assumindo um caráter conservador.

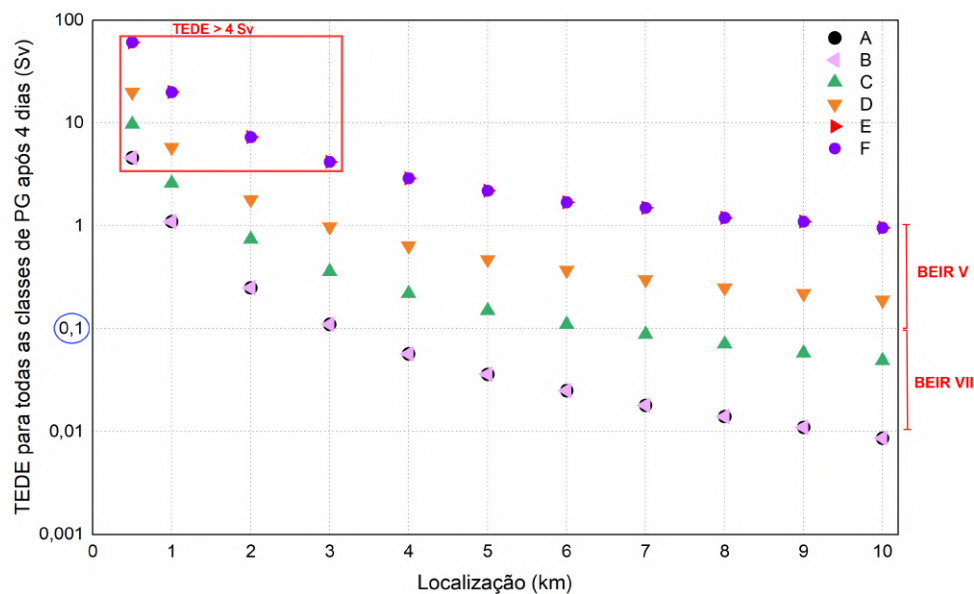
4 RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na avaliação das plumas radioativas, segundo a dispersão de agentes químicos, biológicos, radiológicos e nucleares (QBRN), aplicados a um acidente nuclear hipotético. Para isso, foi avaliada a TEDE resultante em vários locais em uma janela de quatro dias, fase inicial, sobre as classes de Pasquill-Gifford A/B e C em raios de 0,5 a 10 km.

4.1 Dose Efetiva Total Equivalente

A Figura 15 ilustra as implicações da TEDE resultante da planta em vários locais analisados ao longo de uma janela temporal de quatro dias. Observa-se que os níveis de exposição à radiação variam em função da proximidade geográfica em relação ao ponto de liberação, como evidenciado pelas curvas de isodose apresentadas na Figura 20.

Figura 15 – Dose total (TEDE) para uma janela de quatro dias em todas as distâncias e classes de Pasquill-Gifford



Fonte: Autora

A análise da TEDE em diferentes pontos geográficos possibilita não apenas a quantificação da exposição estimada no cenário hipotético, mas também a construção de subsídios técnicos para o planejamento de contingência em saúde pública, considerando a janela temporal adotada neste estudo. A espacialização desses resultados permite identificar áreas com maior concentração de dose e, conseqüentemente, segmentos populacionais que demandariam prioridade em ações de monitoramento, orientação e eventual intervenção.

Diferenças nos valores de TEDE entre os indivíduos expostos podem indicar maior suscetibilidade de determinados grupos demográficos aos efeitos da radiação. Em particular, indivíduos com menos de 20 anos tendem a apresentar uma resposta biológica mais sensível à exposição, o que pode aumentar a probabilidade de efeitos adversos quando submetidos a doses equivalentes.

Nas regiões mais próximas à fonte, identificadas em vermelho na Figura 15, os valores da TEDE excedem o limite de dose efetiva para exposição de corpo inteiro, atingindo valores superiores a 4 Sv. Esse cenário caracteriza uma condição de exposição associada predominantemente a efeitos determinísticos, típicos de doses elevadas, nas quais a gravidade do dano aumenta com a dose absorvida pelo tecido ou órgão exposto (26). Os valores da TEDE superiores a 4 Sv impossibilitam a aplicação de modelos BEIR V e BEIR VII, uma vez que os valores de dose são de $\geq 0,1 Sv$ e $< 0,1 Sv$, respectivamente.

Para cada local, pode-se observar a influência das classes PG na TEDE. Notavelmente, diferentes locais podem apresentar o mesmo nível de exposição; a citar, em 2 km do ponto de liberação sob a classe PG C e em 4 km sob a classe PG D com níveis de TEDE no limite de 1 Sv. Destaca-se também que em 3 e 6 km são encontrados resultados semelhantes, porém com valores em 0,1 Sv e em classes PG B e C, respectivamente. Nota-se, ainda, a sobreposição de resultados entre as classes de PG A/B e E/F.

Os resultados apresentados na Figura 15 demonstram que o decréscimo da dose não ocorre necessariamente de forma linear com a distância, esse fenômeno reflete a complexidade das interações entre a estabilidade atmosférica analisada e o transporte advectivo. Enquanto que as classes instáveis (A e B) promovem uma diluição vertical de forma acelerada, as classes estáveis (E e F) confinam o material radioativo nas proximidades do solo, resultando em doses elevadas a longas distâncias. Este comportamento corrobora com simulações que utilizam o código HotSpot sobre as variações de micrometeorologia em cenários de SMR (94). A observação de doses superiores a 4 Sv em raios de até 3 km em condições estáveis reforça a necessidade de um planejamento de zonas de ação preventiva (*Precautionary Action Zone*, PAZ) mais conservador (23), para reatores de água leve. Nesses casos, a tomada de decisão exige a integração de múltiplos fatores técnicos de proteção pública, como a evacuação, sem a análise da planta nuclear e o monitoramento ambiental, a fim de garantir a sobrevivência da população em risco (97).

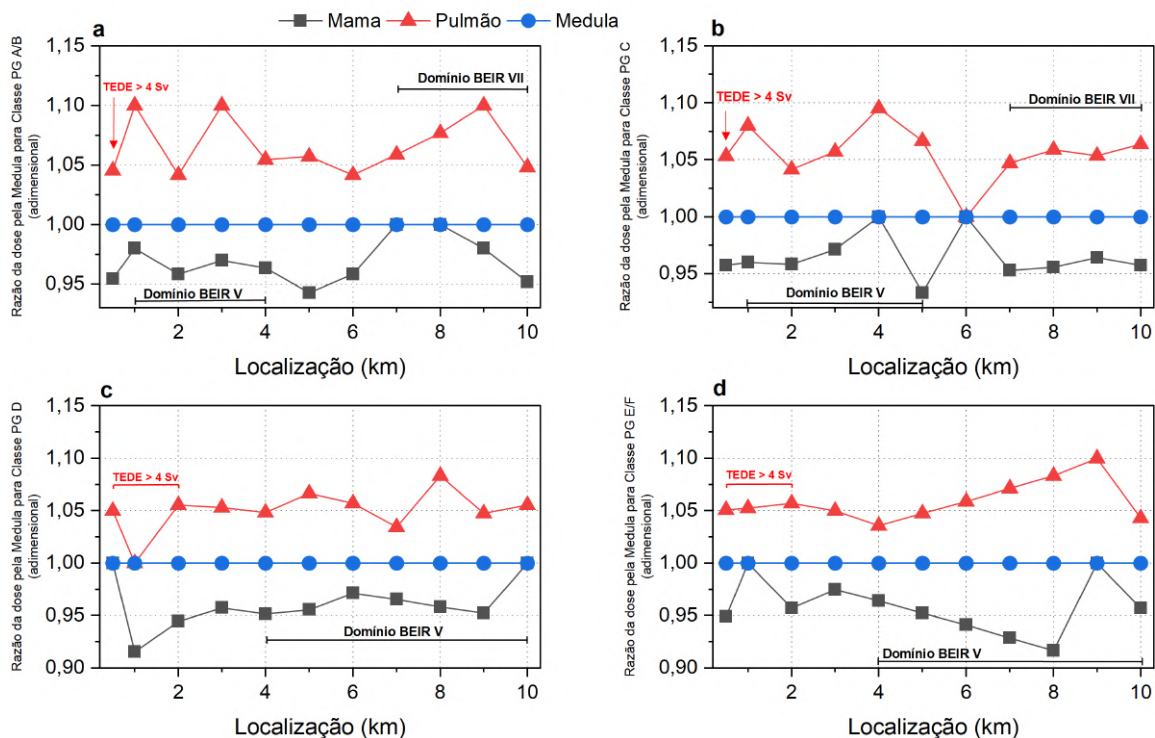
4.2 Caracterização Dosimétrica e Zonas Críticas

A Figura 16 apresenta as razões da Dose Efetiva Total Equivalente (TEDE) para pulmão e mama, normalizadas em relação à medula óssea vermelha, considerando um cenário hipotético de liberação com duração de 4 dias. A adoção da medula vermelha como referência permite comparar a redistribuição da dose entre órgãos críticos, independente-

mente da magnitude absoluta da exposição, destacando diferenças no comprometimento relativo dos tecidos analisados entre as localidades e os grupos demográficos avaliados.

Observa-se que, na Figura 16, o pulmão apresenta razões superiores à unidade (entre 1,03 e 1,10), indicando uma carga radiológica sistematicamente maior em comparação à medula. Em contrapartida, o tecido mamário apresenta razões inferiores a 1 (0,90 a 0,98) em todos os cenários. Tais diferenças persistem ao longo da distância e entre as diferentes classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (PG), exibindo um comportamento oscilatório, mesmo nas regiões onde a TEDE excede o limiar crítico de 4 Sv.

Figura 16 – TEDE para pulmão, mama e medula óssea em (a) classes A-B (b) classe C (c) classe D (d) classes E-F



Nas classes de estabilidade atmosférica PG A e PG B, observa-se predominância do comprometimento pulmonar em relação à medula vermelha, independentemente da localidade analisada. Isso sugere que, sob condições atmosféricas mais instáveis, a inalação tende a desempenhar um papel central na composição da dose, elevando a importância do pulmão como órgão crítico. Nessa situação específica, a variável sexo não altera a hierarquização de prioridade, uma vez que as razões permanecem equivalentes, ainda que as diferenças espaciais entre localidades influenciem os valores absolutos da dose.

Para a classe PG C, os resultados indicam um comportamento distinto. Verifica-se maior aproximação entre os valores de dose no pulmão e na medula vermelha, particularmente em distâncias de 5 a 6 km do ponto de liberação. Essa convergência implica na

equivalência de prioridade da triagem entre esses órgãos nessas localizações, sugerindo que, sob determinadas condições intermediárias de estabilidade atmosférica, a redistribuição da dose entre tecidos críticos torna-se mais equilibrada.

A análise sistemática das razões de dose evidencia a ausência de inversões de prioridade entre os órgãos avaliados. Em termos práticos, não se observam situações em que um órgão inicialmente considerado menos relevante passe, de forma inesperada, a apresentar razão substancialmente superior às demais, alterando a hierarquia estabelecida.

O maior valor identificado corresponde à razão igual a 1, o que indica equivalência entre o órgão analisado e a medula óssea vermelha, utilizada como referência. Não foram identificadas ultrapassagens discrepantes que comprometam a coerência da comparação. Esse resultado confirma a estabilidade dos critérios adotados e reforça a consistência metodológica da escolha da medula óssea vermelha como parâmetro comparativo na análise radioepidemiológica.

Nas classes PG D, E e F, embora não se identifiquem inversões na ordem de prioridade, a variável localização mantém influência significativa sobre os valores relativos de TEDE. Isso indica que, mesmo sob condições atmosféricas mais estáveis, a distância ao ponto de liberação permanece determinante na definição da magnitude e da distribuição orgânica da dose.

No que tange à extensão do risco, a influência das condições meteorológicas manifesta-se de forma determinante. Sob condições de instabilidade atmosférica (Classes A/B), a zona de letalidade ($TEDE > 4$ Sv) restringe-se a um pico localizado próximo a 1 km da fonte, resultado da rápida dispersão vertical da pluma. No entanto, em Classes E/F, a turbulência estende essa zona de perigo extremo a um raio de até 2 km; ou seja, a força que misturaria o ar foi anulada pelas condições atmosféricas. Dessa forma, para a referida simulação, o raio mínimo de evacuação (PAZ) deve ser superior a 2 km em cenários estáveis, pois há a expansão da zona de dose letal, o que possibilita um planejamento melhor frente ao acidente hipotético (97, 98).

No contexto da avaliação de impacto radiológico a 0,5 km da fonte emissora, a dose efetiva atribuída ao pulmão de 0,552 Sv, a medula de 0,528 e mama de 0,504 Sv na classe PG A/B representa as contribuições desses órgãos para a Dose Efetiva Total Equivalente (TEDE) de 4,6, 4,4 e 4,2 Sv, respectivamente, obtida pela aplicação do fator de ponderação tecidual de 0,12 (w_T), apresentado na Tabela 5. Uma dose equivalente direta de 4,6 Sv para o pulmão, resultado da combinação da exposição externa e a inalação das partículas, ultrapassou o limiar para o desenvolvimento de efeitos de reação tecidual, como a pneumonite por radiação e a fibrose pulmonar, além de situar a TEDE na faixa crítica da dose letal mediana ($LD_{50/30}$) para a Síndrome Aguda de Radiação. Essa análise reforça que o pulmão atua como órgão crítico prioritário para a análise inicial do evento, dada a rapidez da incorporação das partículas pelo trato respiratório.

Adicionalmente, esses limiares delimitam a transição dos modelos de risco aplicáveis: as zonas próximas à fonte enquadram-se predominantemente no domínio do relatório BEIR V (altas doses e efeitos determinísticos), enquanto as regiões mais distantes da fonte, onde a dispersão dilui a concentração de contaminantes, transitam para o domínio do BEIR VII, adequado à avaliação de efeitos estocásticos em baixas doses.

De forma geral, os resultados evidenciam que a razão entre a TEDE de órgãos específicos e da medula vermelha constitui uma ferramenta analítica robusta para avaliar a vulnerabilidade relativa entre tecidos críticos em um cenário de exposição aguda. A interpretação dessas relações fornece subsídios técnicos relevantes para o planejamento de ações de saúde pública, para a definição de prioridades médicas e a organização de estratégias de resposta em situações hipotéticas de liberação radioativa, além de contribuir para a compreensão dos possíveis desdobramentos biológicos associados à exposição diferenciada entre órgãos.

Ao analisar a Figura 16, percebe-se que, sob condições atmosféricas de maior instabilidade (A/B), a inalação assume um papel central na composição da TEDE, tornando o pulmão um órgão crítico prioritário para a triagem, com razões superiores à medula óssea vermelha, variando entre 1,03 e 1,10. Com isso, os dados demonstram que o prognóstico e o monitoramento do inventário de radionuclídeos dispersos na forma de aerossóis devem influenciar as primeiras horas da crise, uma vez que a dinâmica atmosférica potencializa a dose interna, justificando, assim, a distribuição urgente de medidas protetivas, como o iodeto de potássio e o isolamento, para mitigar os riscos de sua incorporação via pulmonar (99).

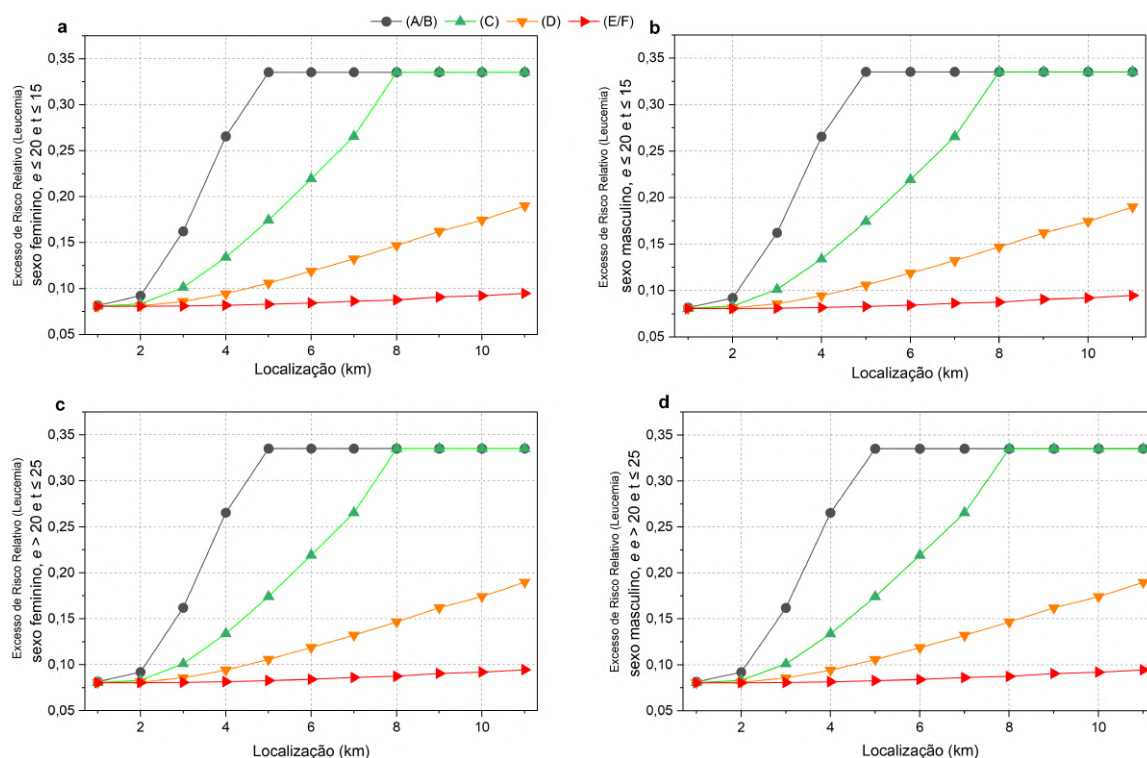
4.3 Avaliação do Risco Epidemiológico de Desenvolvimento de Leucemia

A Figura 17 apresenta estimativas do Excesso de Risco Relativo (ERR) de desenvolvimento de leucemia associado à exposição radiológica acidental. Os resultados indicam que a proximidade da fonte emissora se correlaciona com maiores taxas de incidência de câncer e a efeitos determinísticos. Essa suscetibilidade acentuada, estimada sobretudo para a população jovem, é atribuída à fisiologia em desenvolvimento desses indivíduos e à maior radiosensibilidade decorrente da intensa proliferação celular nessa faixa etária (14, 15, 12).

A análise gráfica evidencia diferenças significativas nas projeções estimadas entre os grupos populacionais definidos por faixa etária e sexo. Nas Figuras 17a e 17b, referentes a indivíduos de ambos os sexos com idades ≤ 20 anos e período de latência ≤ 15 anos, observam-se padrões de decaimento semelhantes em função da distância. Comportamento análogo verifica-se nas Figuras 17c e 17d, que ilustram o ERR para adultos (idade > 20

anos) com latência ≤ 25 anos, indicando que a morfologia das curvas de risco se mantém consistente entre os sexos, variando principalmente em magnitude conforme a faixa etária.

Figura 17 – Relação do excesso de risco relativo para leucemia e tempo de latência (a) indivíduos do sexo feminino com idade menor ou igual a 20 anos (b) indivíduos do sexo masculino com idade menor ou igual a 20 anos (c) indivíduos do sexo feminino com idade maior que 20 anos (d) indivíduos do sexo masculino com idade maior que 20 anos



Fonte: Autora

Conforme a classe de estabilidade atmosférica (PG), a TEDE pode, em determinadas situações, apresentar valores mais elevados em distâncias maiores do ponto de liberação do que nas áreas próximas a fonte. Tal comportamento é evidenciado na análise da Figura 17, especialmente pela observação das linhas verticais do gráfico, que permitem comparar as variações espaciais da dose.

No mesmo local, os valores de ERR variam conforme muda a classe PG. Essa variabilidade evidencia a importância de programas contínuos de vigilância epidemiológica e de acompanhamento sistemático das populações expostas a fatores ambientais ou genéticos. Considerando que determinadas neoplasias podem apresentar longo período de latência, seus efeitos podem manifestar-se apenas após anos, ou mesmo décadas da exposição inicial.

Sob condições atmosféricas instáveis (classes PG A/B), observa-se um crescimento mais acentuado nas imediações da fonte emissora, atingindo um ERR de aproximadamente 0,34 a 5 km da fonte, onde se estabiliza. A classe C apresenta um comportamento semelhante, admitindo variações de até 0,34 a 8 km, convergindo com a classe A/B. Esses

valores mostram que, entre 5 e 8 km em cenários específicos, cada 1 gray de dose de radiação absorvida gera um aumento de 34% no excesso de risco relativo de desenvolvimento de leucemia. Por outro lado, a linha laranja (D) exibe um crescimento mais lento e sutil, terminando nas proximidades de 0,19 em 11 km, enquanto a classe E/F permanece praticamente estável e linear ao longo de toda a distância, com variância de ERR de 0,08 a 0,09.

Os gráficos para a população jovem (até 20 anos), destacados nas Fig. 17a e 17b, são visualmente idênticos aos da população adulta (maiores que 20 anos), apresentados nas Fig. 17c e 17d. Isso indica que, para o modelo matemático ou conjunto de dados apresentado, o ERR de leucemia em relação à localização geográfica independe do sexo biológico ou da idade/tempo de exposição dos indivíduos, sendo determinado pelo tipo de cenário (A/B, C, D ou E/F) e pela distância em quilômetros.

Contudo, a morfologia das curvas reafirma que o risco aumenta com a distância, iniciando com valores mínimos nas áreas de 1 a 3 km e atingindo o patamar crítico (em cerca de 0,34) de risco a partir de 5 km para as classes de instabilidade atmosférica (A/B). Esse aumento demandaria ações de proteção nessas zonas mais distantes onde a pluma atinge seu impacto máximo de risco relativo. Essas condições facilitam a agilidade na tomada de decisão, acelerando as medidas protetivas e operacionais para a população afetada.

Ao comparar os riscos biológicos das doses de corpo inteiro (TEDE) pelas diferentes vias de contaminação em crianças e na população adulta por meio da Equação 2.24 a 4 e 8 km de distância da fonte emissora, a TEDE resultou em 5,70E-02 e 1,40E-02, respectivamente. Notou-se que crianças expostas a 4 km apresentam um risco 3 vezes maior que a população adulta, conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Relação de TEDE (Sv) para crianças e adultos nas distâncias de 4 km e 8 km da fonte emissora

Distância	Criança		População Adulta	
	Masculino	Feminino	Masculino	Feminino
4 km	1,96E-01	2,14E-01	6,58E-02	7,18E-02
8 km	4,65E-02	5,07E-02	1,56E-02	1,70E-02

A partir da expressão do Excesso de Risco Relativo (ERR), apresentada na Tabela 6, quantifica-se o Risco Relativo ($RR = ERR + 1$), para determinar quantas vezes o risco do grupo exposto é maior em comparação com o grupo não exposto (o grupo de controle/base). A Tabela 13 apresenta uma análise comparativa do risco relativo por grupo e sexo utilizando o modelo BEIR VII.

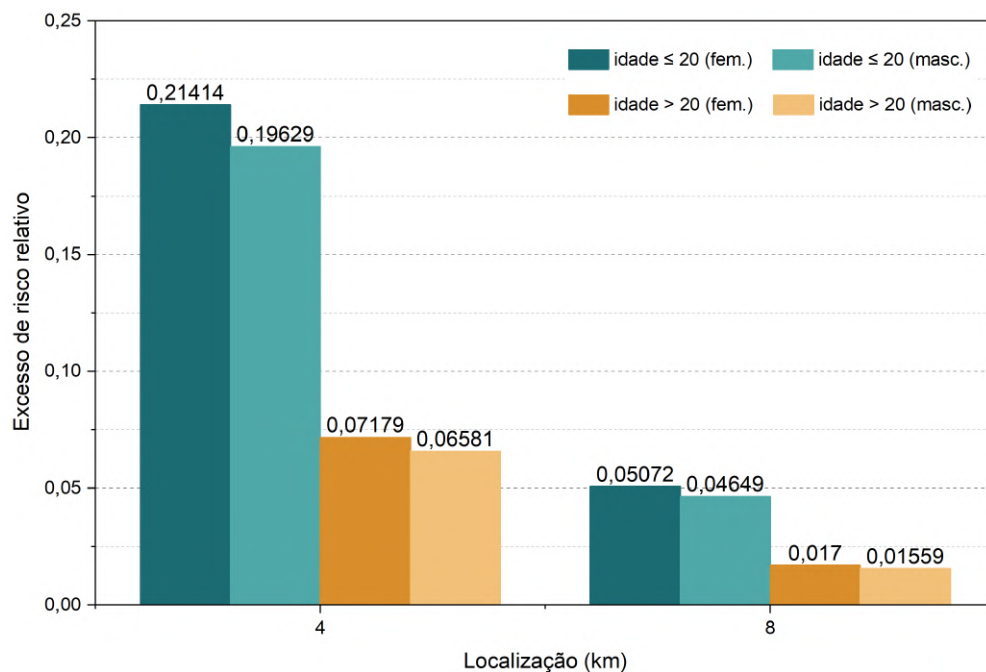
A Figura 18 evidencia que tanto a idade no momento da exposição quanto o sexo

Tabela 13 – Relação entre risco relativo (RR) por grupo e sexo (BEIR VII).

Grupo de exposição	Sexo	ERR	RR = ERR + 1
Crianças ($t = 15$ anos)	Masculino	0,196	1,196
	Feminino	0,214	1,214
Adultos ($t = 25$ anos)	Masculino	0,0658	1,0658
	Feminino	0,0718	1,0718

exercem influência na expressão do risco radiológico tardio. Ao converter o excesso de risco em risco relativo, observa-se que o grupo mais jovem apresenta uma vulnerabilidade significativamente maior, com valores de risco de 19,6% para o sexo masculino e 21,4% para o feminino em relação a taxa basal da população, enquanto o grupo com mais idade exibe acréscimos mais discretos, 6,58% e 7,18% respectivamente. Isso acontece devido aos tecidos em rápido crescimento, dessa forma, as taxas de divisão celular são maiores, levando a uma expectativa de vida longa para que o câncer se desenvolva, reforçando a necessidade de abordagens de radioproteção focada em subgrupos populacionais mais sensíveis.

Figura 18 – ERR para tempos de exposição de 15 e 25 anos em indivíduos dos sexos masculino e feminino localizados a 4 e 8 km da fonte emissora

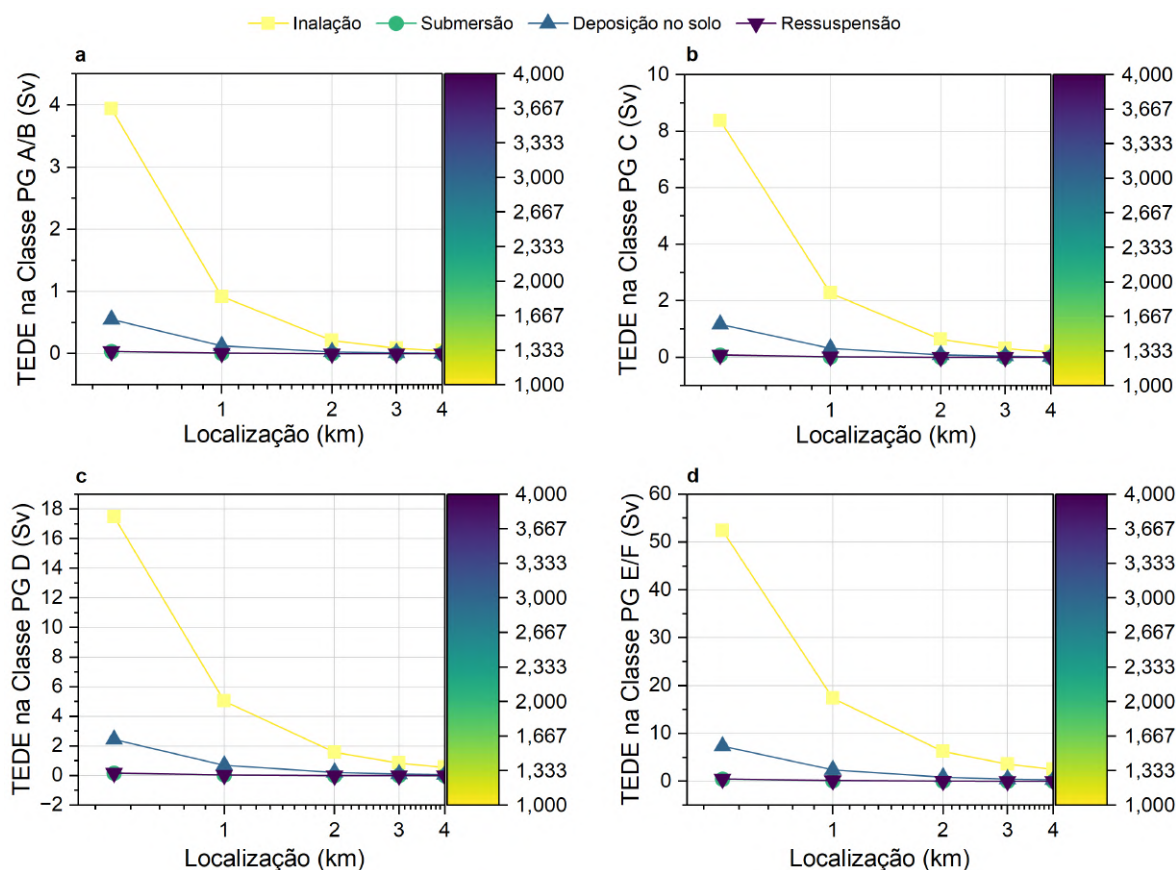


Fonte: Autora

A Figura 19 mapeia a contribuição de quatro vias de exposição radiológica para a população: inalação, submersão na pluma, deposição de radionuclídeos no solo e ressuspensão. A morfologia das curvas revela um padrão de decaimento exponencial à medida

que a distância da fonte aumenta. O pico máximo de dose ocorre nas proximidades da fonte (até 1 km), sofrendo uma redução entre 2 e 3 km, e atingindo uma forma assintótica próxima a zero a partir de 4 km de distância.

Figura 19 – Diferentes vias de exposição para as classes (a) A/B (b) C (c) D e (d) E/F



Fonte: Autora

Dentre as vias avaliadas, a inalação (representada pela linha amarela) é a rota de exposição dominante em todos os cenários meteorológicos, seguida pela deposição no solo (linha azul) nas proximidades da fonte, comportamento que se evidencia pela absorção dos MPs pelo pulmão, condição semelhante ao potássio (12). As contribuições por submersão e ressuspensão mostram-se praticamente nulas na escala adotada.

Ao comparar os quatro cenários meteorológicos, os gráficos evidenciam o impacto crítico da estabilidade atmosférica sobre as doses recebidas pela população. Nas classes de maior instabilidade e turbulência (Figuras 19a e 19b), a dispersão vertical e horizontal da pluma é favorecida, resultando em doses máximas a baixos picos (até 4 e 8 Sv, respectivamente) nas proximidades da fonte. Por outro lado, sob condições de atmosfera estável (PG E/F), a ausência de turbulência impede a diluição dos contaminantes, fazendo com que a pluma viaje de maneira concentrada próxima ao solo, gerando um cenário de severidade extrema, no qual a dose por inalação ultrapassa os 50 Sv nos primeiros quilômetros, o que representa um limiar imediato de letalidade e justifica intervenções

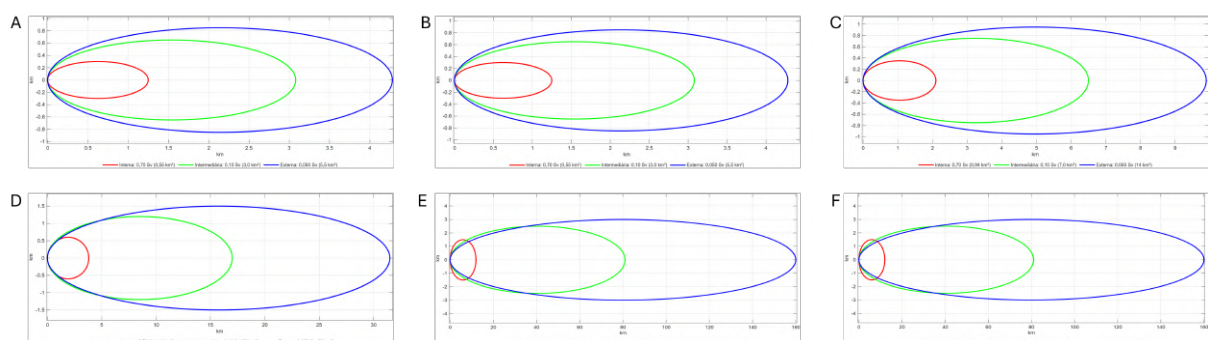
emergenciais severas.

A predominância da via de inalação como principal contribuinte para a TEDE (Figura 19) deve-se à rápida absorção do Césio-137, que possui comportamento biocinético análogo ao potássio no metabolismo humano (12). Dessa forma, a física do material justifica o risco acentuado de desenvolvimento de leucemia quando projetado para a população mais jovem, por possuir taxas de proliferação elevadas, o que potencializa a sensibilidade à radiação ionizante. Ao comparar o ERR em 0,34 para as zonas de instabilidade, apresentadas na Figura 17, os resultados confirmam a hipótese de que a dispersão atmosférica em centros urbanos litorâneos como os simulados, pode criar picos de risco em médias distâncias, exigindo uma vigilância e avaliação epidemiológica em longo prazo conforme os apresentados pelos modelos BEIR V e VII (73, 17).

4.4 Análises das Curvas de Isodoses

A Figura 20 apresenta as isodoses interna, intermediária e externa, que correspondem aos limites de dose para os níveis de doses equivalentes a 700 , 100 e 50 mSv respectivamente, em cada classe de estabilidade de Pasquill-Gifford (PG A-F). A geometria das elipses formadas evidencia uma correlação direta entre as dimensões da área afetada e as condições micrometeorológicas, destacando como a turbulência atmosférica modifica a relação entre a dispersão e a concentração do material radioativo em diferentes distâncias da fonte emissora.

Figura 20 – Isodoses para as diferentes classes de PG (A) Classe A (B) Classe B (C) Classe C (D) Classe D (E) Classe E e (F) Classe F



Fonte: Autora

É imperativo ressaltar que, em cenários reais de centros urbanos, a liberação ambiental de material radioativo não ocorre de forma ideal. A presença de edificações e a rugosidade do terreno influenciam significativamente a advecção (transporte horizontal ou vertical de poluentes) e difusão do material, alterando a morfologia prevista pelas isodoses e introduzindo complexidades que podem dificultar a agilidade das medidas de

ação direta (53). No entanto, a análise das classes de estabilidade permite prever tendências macroscópicas importantes para o planejamento do cenário em estudo.

Ao avaliarmos as classes instáveis (A/B), nota-se que a intensa mistura vertical e lateral (y e z) promove uma rápida diluição das partículas de Cs-137 no ar. Embora isso restrinja o alcance longitudinal da pluma, o que gera uma área de impacto alargada nas imediações da fonte, aumentando a complexidade da evacuação imediata devido à contaminação.

Em contrapartida, a dinâmica altera-se drasticamente nos cenários de alta estabilidade (Classes E e F). A turbulência vertical impede a dispersão do material para as camadas superiores da atmosfera, resultando em uma pluma confinada que se desloca ao longo de grandes distâncias próximas ao solo. Nesses casos, a concentração de dose permanece elevada a dezenas de quilômetros da fonte, elevando a contaminação em pontos distantes e com potencial de saturar rapidamente os recursos sanitários regionais, que poderiam não estar sob condições de alerta imediato.

Sob a ótica da resposta a emergências ambientais, essa realidade apresenta desafios distintos. Nos cenários instáveis, a rápida dispersão de materiais exige uma resposta massiva e geograficamente concentrada. Por outro lado, nos cenários estáveis, apesar da alta toxicidade radiológica a longas distâncias, a menor dispersão lateral (formato de "corredor" estreito) favorece as medidas de ação emergenciais. O confinamento da pluma, presente em classes neutras e estáveis (como D, E e F) permite delimitar de maneira mais precisa as zonas de exclusão, facilitando a identificação de rotas de fuga seguras, de maneira transversal a direção do vento, otimizando as ações prioritárias para mitigar a exposição da população.

Cabe ressaltar, ainda, que as classes PG superiores a C demarcam um cenário de estabilidade atmosférica, conforme já discutido, de modo que as análises sobre o evento se tornam menos robustas, dificultando o gerenciamento das zonas afetadas. Dessa forma, as classes D, E e F não fizeram parte das análises envolvendo o software de sistema de informação geográfica.

4.5 Valores de Inalação do Radionuclídeo nos Órgãos e Tecidos

A Figura 21 ilustra a janela do código HotSpot com os equivalentes de dose de radiação integrados de 50 anos para a inalação aguda de radionuclídeos, com base no FGR-11, que se baseia em modelos bioquímicos e dosimétricos da ICRP (23).

Para a estimativa dosimétrica, utilizou-se a biblioteca de nuclídeos baseada nos coeficientes de conversão de dose (DCFs) estabelecidos pelos relatórios FGR 11/12 e ICRP 30. O cenário modelou a inalação de cézio-137 (Cs-137), classificado com solubilidade tipo

Figura 21 – Janela do código HotSpot com dados de equivalentes de dose de radiação integrados de 50 anos para a inalação aguda de radionuclídeos por órgãos

Radionuclide: **Cesium**

View Inhalation DCFs View Submersion DCFs View Ground Shine DCFs

Return

CS-137 D 30.0y

FGR 11/12 DCF values. ICRP series 30.

Inhalation Dose Conversion Factors (sievert / becquerel)

R Marrow	8,30E-09	ULI Wall	8,96E-09	Adrenals	9,46E-09
Lung	8,82E-09	LLI Wall	9,08E-09	Skin	6,58E-09
SI Wall	9,06E-09	Kidneys	8,61E-09	Spleen	8,63E-09
Thyroid	7,93E-09	Liver	8,59E-09	Testes	8,76E-09
Breast	7,84E-09	Bld Wall	8,89E-09	Thymus	7,83E-09
Esophagus	7,83E-09	Muscle	7,84E-09	Brain	not listed
St Wall	8,61E-09	Ovaries	8,12E-09	Uterus	9,04E-09
B Surface	7,94E-09	Pancreas	8,44E-09		

SI Classic One micron AMAD 50-yr CEDE 8,63E-09

Fonte: Autora

D (rápida absorção) e diâmetro aerodinâmico médio de atividade (AMAD) de $1 \mu\text{m}$.

Os coeficientes de inalação específicos para os órgãos de interesse denotam para o pulmão $8,82 \times 10^{-9}$ Sv/Bq e apresentam valores superiores aos da medula óssea $8,30 \times 10^{-9}$ Sv/Bq e $7,84 \times 10^{-9}$ Sv/Bq para a mama, fundamentando as variações observadas posteriormente nas razões de dose entre órgãos. Os coeficientes de inalação para rins e fígado apresentam valores próximos, $8,61 \times 10^{-9}$ Sv/Bq e $8,59 \times 10^{-9}$ Sv/Bq, respectivamente. Isso evidencia a distribuição relativamente homogênea do Cs-137 após a absorção sistêmica, compatível com seu comportamento biocinético, e com sua analogia metabólica com o potássio. A proximidade entre os coeficientes indica que o risco associado não se restringe ao aparelho respiratório, mas decorre principalmente da exposição sistêmica prolongada ao célio.

4.6 Distribuição de Frequência Conjunta (JFD)

A análise dos dados meteorológicos horários anuais, derivados do registro contínuo, hora a hora, de variáveis climáticas no próprio software, compreendeu um total de 8.241 observações, processadas por meio da construção de uma Distribuição de Frequência Conjunta (*Joint Frequency Distribution*, JFD), que é uma metodologia amplamente empregada em modelagens de dispersão atmosférica. A JFD permite correlacionar simultaneamente as

classes de estabilidade atmosférica e as direções predominantes do vento, fornecendo uma representação estatística integrada das condições meteorológicas ao longo do período analisado. A partir dessa base, foi calculada a distribuição de frequência cumulativa ordenada, possibilitando a determinação de valores percentis de dose, fundamentais para avaliações probabilísticas de risco e para a identificação de cenários representativos de exposição.

Conforme ilustrado na Figura 22, os dados foram organizados em nove grupos estruturais que contemplam as sete classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (A a G), oito grupos de ventos (o grupo 0 representa ventos calmos abaixo de 0,5 ou 1 m/s e grupo 8 ventos muito fortes) e 16 direções cardeais, colaterais e subcolaterais do vento. Essa combinação resulta em 1.008 cenários meteorológicos possíveis, cada um representando uma condição específica de dispersão atmosférica. Tal estruturação não apenas sistematiza o tratamento estatístico das observações, mas também otimiza o processamento computacional, reduzindo o número de simulações necessárias sem comprometer a representatividade dos resultados.

Observou-se que em diferentes classes de velocidade do vento, os grupos 3, 7 e 8 apresentam faixas distintas de velocidade. O grupo 3 apresenta uma faixa de vento considerada leve, com baixa participação no registro total de observações, somando apenas 0,243%, comportamento distribuído nas classes de estabilidade C (0,109%) e D (0,085%), indicando um ambiente de neutralidade ou leve instabilidade. O grupo 7, apresenta ventos de intensidade moderada, com 0,449% das observações e comportamento majoritariamente sobre a classe A (0,352%), indicando a pouca incidência de vento nessa velocidade, mas, com extrema instabilidade atmosférica. O último grupo, 8, concentra o grupo crítico para as análises de dispersão de pluma, possuindo uma forte associação com as classes de estabilidade D e E, condições nas quais a atmosfera força o poluente a se deslocar em corredores estreitos e altamente concentrados, somando 99,22% de todas as observações meteorológicas. Dentro desse grupo, a atmosfera apresenta-se de forma equilibrada sobre todas as classes PG, com percentuais de 27,23%, 13,09%, 18,21%, 22,10% e 15,46% nas classes de A a E, respectivamente, onde os ventos fortes conduzem a pluma com maior frequência nas direções oeste-sudoeste (OSO) e norte-noroeste (NNO). Configurações desse tipo indicam uma tendência de maior dispersão de césio-137, o que concorda com os dados apresentados nas Figuras 30 e 31 e justifica as escolhas feitas para o estudo.

4.7 Análise segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Com base no censo do IBGE mais recente (24), a população estimada do estado de Sergipe é de 2.210.004. Especificamente para o município de Aracaju (AJU), o censo de 2022 contabilizou uma população de 602.757 habitantes. Naquele ano, 192.330 dos habitantes de Sergipe residiam em Nossa Senhora do Socorro (NSS). A Figura 23 ilustra a área de interesse nos dois municípios, considerando um raio de 10 km a partir do ponto de

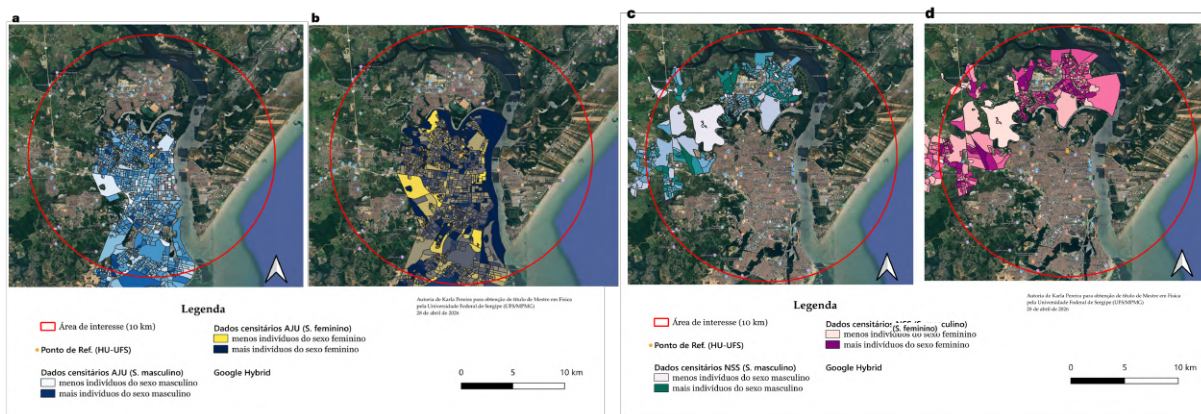
Figura 22 – Observações meteorológicas de ventos anuais nas 16 direções para os grupos de ventos nas classes PG de A a G

Meteorological Input file processed as MACCS2 - wind TOWARD sector																			
Total meteorological observations : 8241																			
	G	SC	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	Compass Direction the Wind is coming FROM										Row
									SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NNW	Sum	
0 A	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
0 B	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
0 C	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
0 D	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
0 E	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
0 F	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
0 G	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
Col Sum	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 A	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 B	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 C	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 D	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 E	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 F	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
1 G	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
Col Sum	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 A	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 B	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 C	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 D	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 E	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 F	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
2 G	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
Col Sum	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
3 A	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,000	0,024 %	
3 B	0	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,024 %	
3 C	0	0,000	0,097	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,109 %	
3 D	0	0,000	0,061	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,085 %	
3 E	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
3 F	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
3 G	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
Col Sum	0	0,000	0,170	0,036	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,000	0,243 %	
7 A	0	0,000	0,012	0,024	0,036	0,000	0,049	0,036	0,049	0,000	0,024	0,012	0,012	0,012	0,036	0,049	0,000	0,352 %	
7 B	0	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,036 %	
7 C	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036 %	
7 D	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012 %	
7 E	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012 %	
7 F	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
7 G	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000 %	
Col Sum	0	0,012	0,012	0,024	0,036	0,024	0,061	0,049	0,049	0,012	0,024	0,024	0,012	0,012	0,036	0,049	0,012	0,449 %	
8 A	1	1,626	1,820	1,675	1,832	1,541	1,262	1,177	0,971	1,359	1,662	1,929	2,512	2,633	2,475	1,359	1,395	27,23 %	
8 B	1	1,444	1,056	0,934	1,056	0,631	0,376	0,413	0,413	0,607	0,631	1,068	1,456	1,250	0,898	0,449	0,413	13,09 %	
8 C	0	0,910	1,274	2,973	1,614	0,837	0,546	0,983	0,522	1,019	0,959	1,226	1,493	1,359	1,432	0,655	0,413	18,21 %	
8 D	0	0,291	1,068	2,354	1,019	0,959	0,825	0,983	1,881	2,742	2,136	1,990	1,565	1,432	1,432	0,934	0,485	22,10 %	
8 E	0	0,109	1,068	0,922	0,716	0,667	0,813	0,849	1,286	1,759	1,784	1,759	1,323	0,789	0,643	0,546	0,425	15,46 %	
8 F	0	0,085	0,449	0,170	0,061	0,109	0,267	0,097	0,182	0,218	0,255	0,206	0,243	0,146	0,133	0,194	0,121	2,937 %	
8 G	0	0,036	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,036	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,000	0,000	0,049	0,012	0,194 %	
Col Sum	4	4,502	6,735	9,028	6,298	4,745	4,114	4,538	5,254	7,705	7,426	8,179	8,628	7,608	7,014	4,186	3,264	99,22 %	

Fonte: Autora

emissão e as densidades populacionais por sexo diante das classes de PG A/B e C. Os recortes de doses para a capital, é mostrado na Figura 24.

Figura 23 – Gráficos de densidade populacional para os sexos (a) masculino (b) feminino (c) masculino e (d) feminino em Aracaju e Nossa Senhora do Socorro, respectivamente



Fonte: Autora

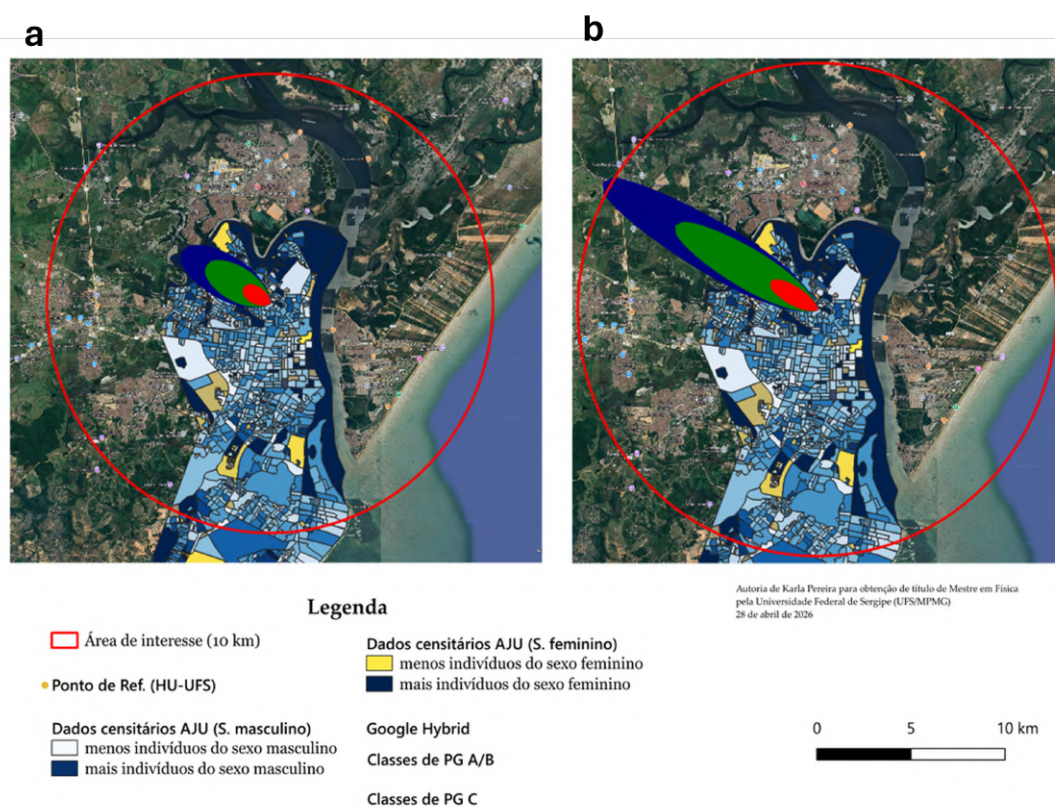
A dose de 700 mSv (curva vermelha), mostrada na Figura 24 representa o cenário mais crítico. A população exposta na classe A/B foi de 14.218 enquanto a classe C, apresentou 20.449 possíveis indivíduos expostos, conforme destaca o gráfico da Figura 25. Em 100 mSv (curva verde), o valor limite entre os modelos de equações para câncer radioinduzido, resultou em 46.511 indivíduos expostos na classe PG A/B; em contrapartida, o cenário mais conservador resultou em 47.783 expostos. A curva mais externa, 50 mSv (curva azul), ressalta que essa dose exige uma abrigagem. Dessa forma, para a classe A/B, gerou uma exposição de 56.813 indivíduos, mas, para a classe C, a população exposta foi acrescida de mais 16.000 pessoas expostas.

As análises para a sub-região de interesse, destacada na Figura 26, mostram que visualmente a região mais afetada é a capital sergipana, Aracaju.

A curva de 100 mSv apresentada na Figura 27 para o segundo cenário apresentou ausência, motivo que se justifica pela concentração de material disperso apenas na capital. Em 50 mSv (curva azul) na classe A/B foi percebido mais de 1.000 indivíduos expostos no evento simulado, mas quando analisado na classe C, a exposição superou a casa dos 10.000 indivíduos. Ao comparar essas duas análises em ambos os cenários e população, podemos destacar que devido a turbulência do vento em A/B há uma maior dispersão de material, mas quando não há esse fator, a pluma radioativa se concentra na proximidade do solo, fazendo com que haja a via de exposição com grande contribuição seja a inalação, mas que ocorra o prolongamento em forma de corredor, fazendo com que a pluma se expanda para regiões distantes de onde ocorreu o evento.

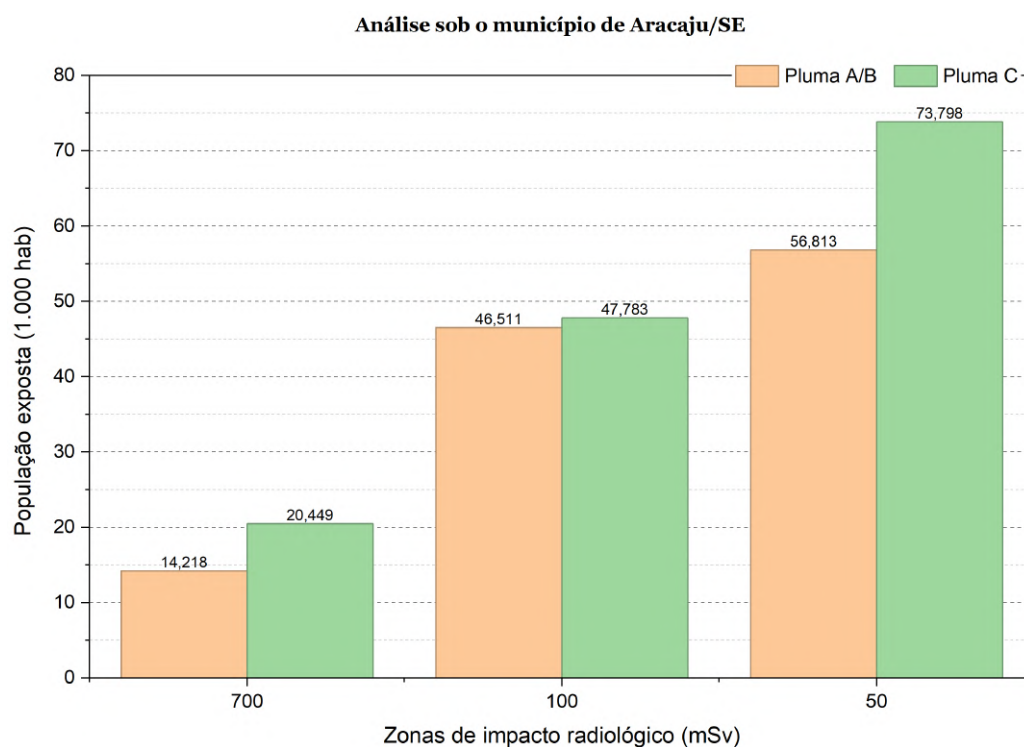
O esquema de cores destacado na Figura 29 apresenta o caráter visual da exposição

Figura 24 – Mapa do evento disruptivo sob os dados censitários para as classes PG (a) A/B e (b) C em Aracaju



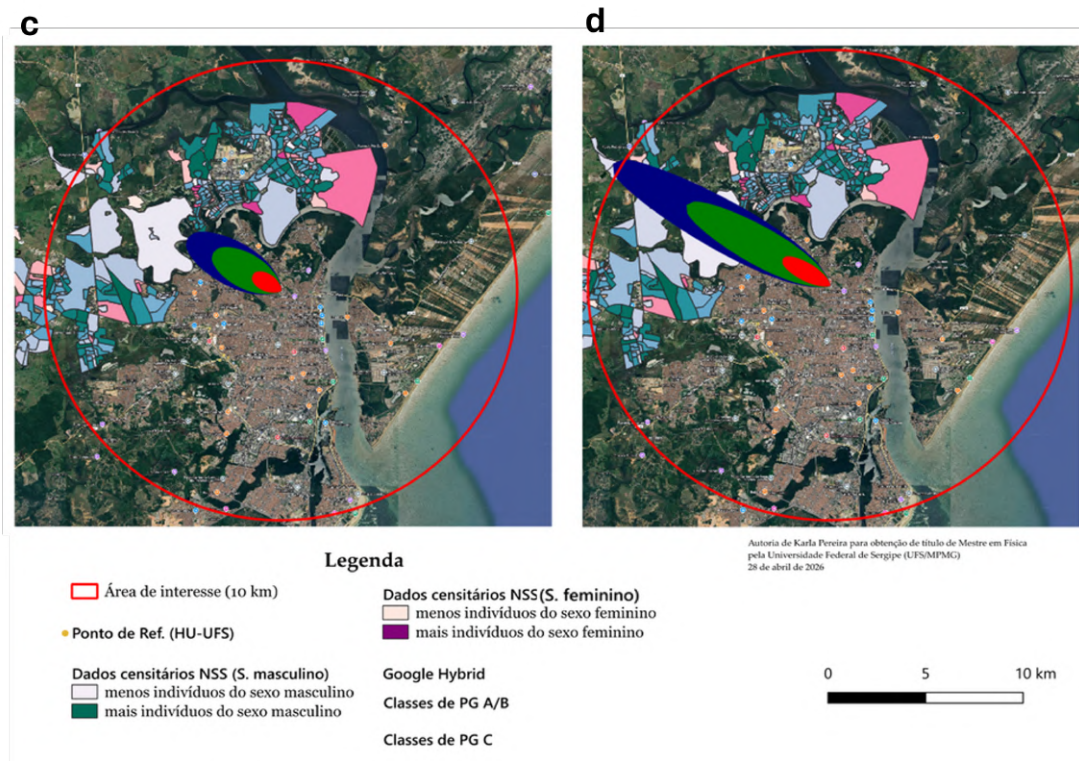
Fonte: Autora

Figura 25 – População exposta com a expansão da pluma



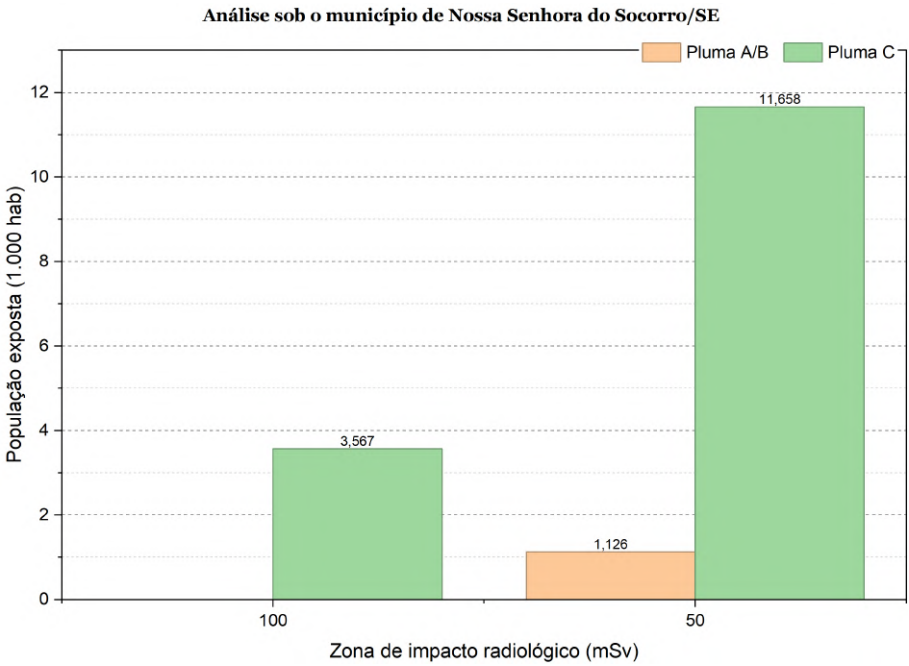
Fonte: Autora

Figura 26 – Mapa do evento disruptivo sob os dados censitários para as classes PG (c) A/B e (d) C em Nossa Senhora do Socorro



Fonte: Autora

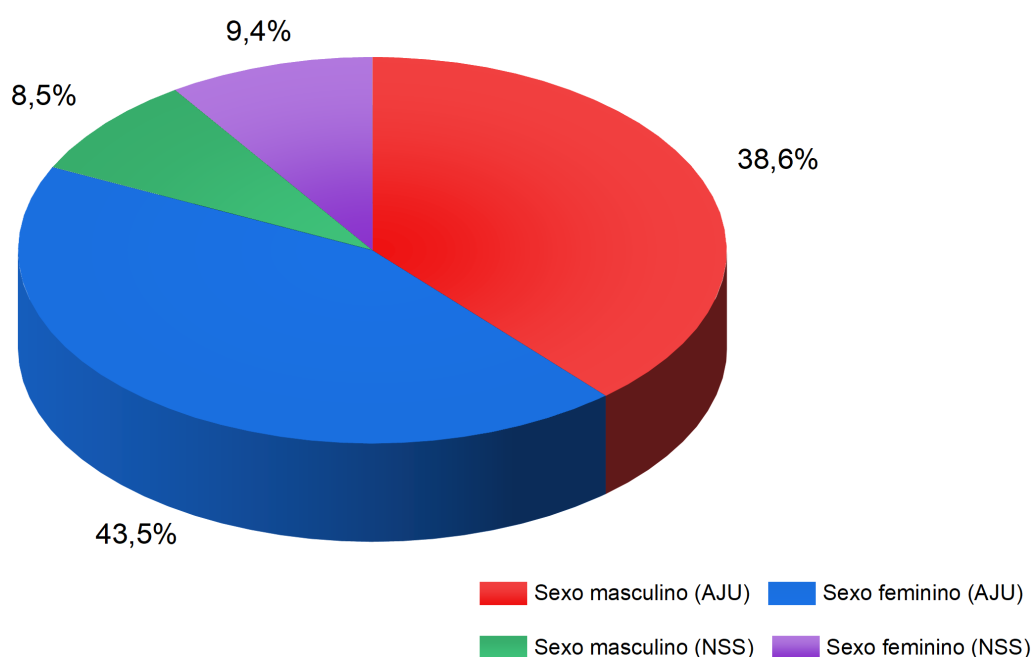
Figura 27 – População exposta com a expansão da pluma



Fonte: Autora

sobre as áreas de interesse, sob a perspectiva dos habitantes por sexo. Em concordância com os dados, a Tabela 14 apresenta o quantitativo da população segundo o censo de 2022 e o comparativo dos indivíduos expostos ao acidente. A integração dos resultados do HotSpot ao ambiente GIS permitiu identificar que para a população aracajuense, cerca de 38,6% e 43,5% dos indivíduos expostos são do sexo masculino e feminino respectivamente. No caso da população socorrense, estima-se que 8,5% dos indivíduos sejam do sexo masculino e 9,4% do sexo feminino, conforme destaca a Figura 28.

Figura 28 – Análise da população exposta nas duas regiões

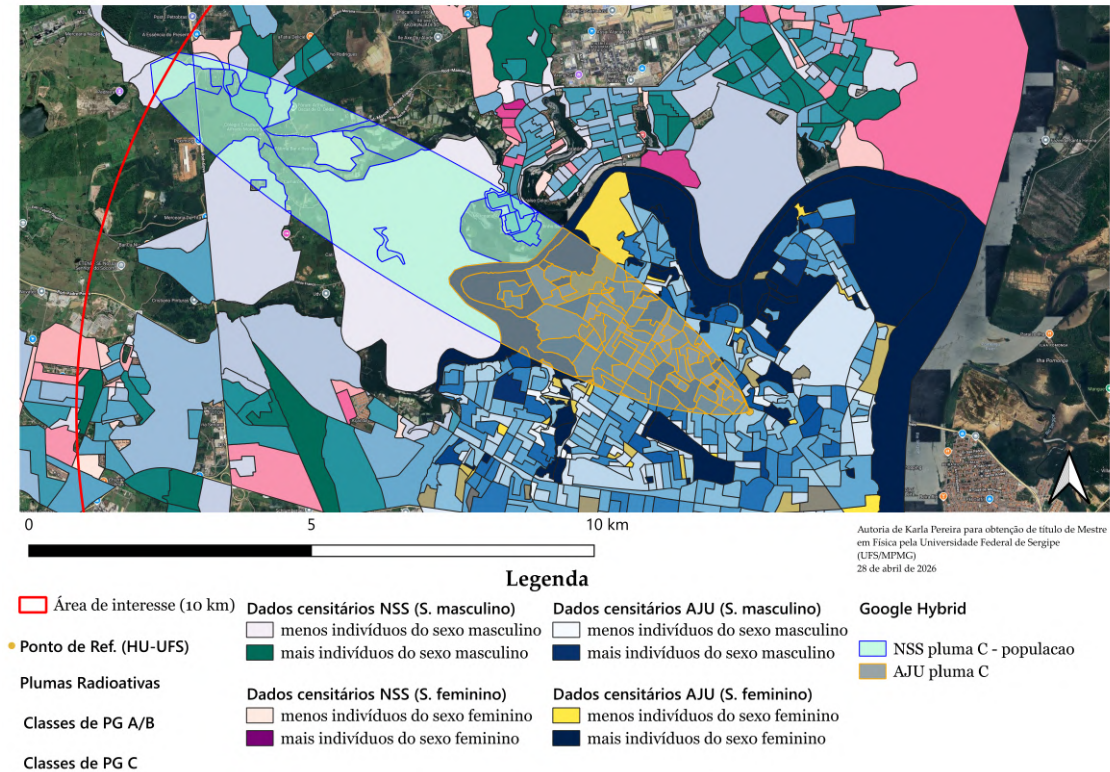


Fonte: Autora

A curva representada pela Figura 29 (em tons de azul com bordas alaranjadas e verde de bordas azul respectivamente), denota a classe atmosférica de PG para um cenário C onde a estabilidade é mais neutra, característica associada a ventos fracos e baixa radiação solar, quando comparada com as classe de PG A/B na qual a instabilidade potencializa o vento e a radiação solar, apresentando possíveis cenários mais resilientes deste tipo de evento. A legenda da referida figura destaca por cor quais bairros têm mais pessoas de um sexo que de outro, num raio de 10 km e com um recorte da pluma sobre os habitantes das duas cidades.

Esta análise geoespacial supera as limitações teóricas dos modelos gaussianos ao atribuir características demográficas reais à área de impacto. As análises por grupos (crianças e adultos) mais vulneráveis nas zonas de 50 mSv e 100 mSv, apresentadas na Tabela 15, dialogam com o conceito de resiliência urbana (67, 66), evidenciando que a morfologia plana e a umidade de Aracaju facilitam a propagação horizontal de contaminantes (90), tornando a tomada de decisão dependente da direção dos ventos captados pelo INMET, como mostrado na Figura 30.

Figura 29 – Área da pluma sobre os aracajuenses e socorrenses expostos no cenário disruptivo de Classe C de Pasquill-Gifford



Fonte: Autora

Tabela 14 – Total de habitantes segundo o Censo 2022 e sob a pluma radioativa (24)

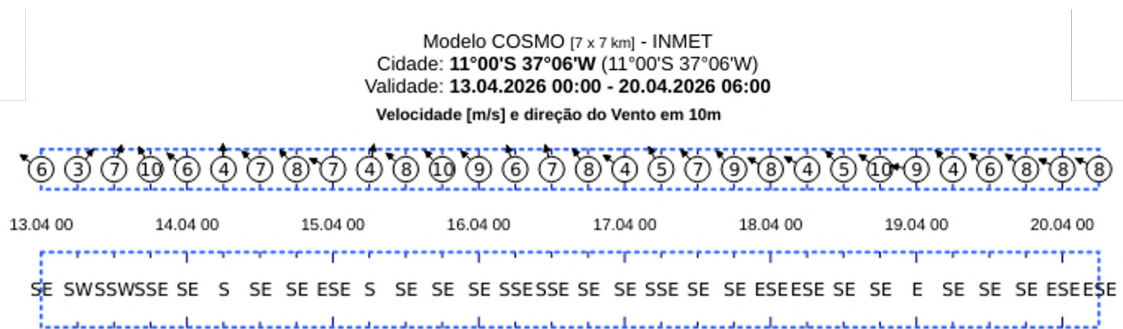
Sexo	Total de Habitantes (Censo 2022)		Habitantes Sob a Pluma	
	Aracaju	N. S. Socorro	Aracaju ^a	N. S. Socorro ^b
Masculino	276.602	91.164	25.069	5.541
Feminino	326.155	101.166	28.280	6.117

^a População estimada sob a pluma radioativa no município de Aracaju.

^b População estimada sob a pluma radioativa no município de Nossa Senhora do Socorro.

Ao correlacionar os dados censitários com a rosa dos ventos (Figura 31), verifica-se que a frequência predominante dos ventos em direções específicas pode direcionar a pluma radioativa para áreas de maior densidade populacional. Analisando os meteogramas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) apresentados na Figura 30 para os dias 13 a 20 de abril de 2026, período inicial da estação chuvosa na região, a direção dos ventos em 10 m variou de Leste (E) a Sul (S) na capital sergipana, mostrando concordância com o padrão anual de ventos destacado na rosa dos ventos encontrada na Figura 31 (100).

Figura 30 – Meteograma de Aracaju/SE para o período de 13/04/2026 a 20/04/2026 (100)



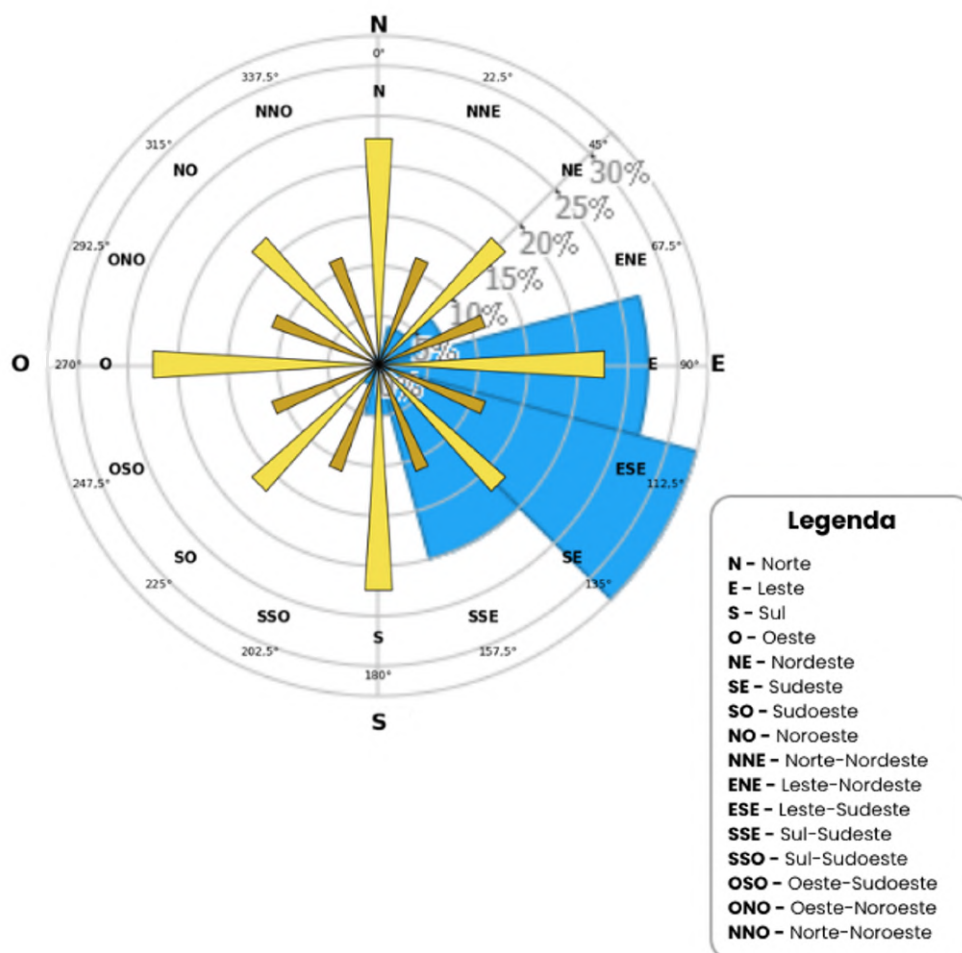
Fonte: Adaptado do INMET (100)

Dessa forma, a tomada de decisão estratégica deve ser priorizada na direção contrária à predominância dos ventos; assim, nas direções de Leste-Nordeste (ENE) a Sul-Sudeste (SSE), as regiões que demandam atenção, segundo as análises, vão desde Oeste-Sudoeste (OSO) a Norte-Noroeste (NNO).

Em critérios de interesse, assim como observado em outras capitais brasileiras, Aracaju como um todo possui uma parcela significativa de indivíduos com idade entre 15 e 64 anos, acompanhada de uma fração razoável de crianças e idosos. Do ponto de vista radiológico, esses grupos apresentam diferentes níveis de vulnerabilidade. Crianças tendem a absorver doses mais elevadas de radiação por unidade de massa corporal, que caracteriza uma condição de maior suscetibilidade a efeitos de longo prazo. Por outro lado, os idosos podem apresentar maior risco de complicações imediatas devido à menor capacidade de recuperação fisiológica. Comparando esse caráter com as doses de radiação decorrentes da pluma sobre as duas cidades, a Tabela 15 apresenta um comparativo dessas doses para esses dois grupos.

Com esses resultados, destaca-se que crianças e idosos de ambos os sexos assim como a população feminina são os grupos prioritários frente a esse incidente nuclear simulado, quando analisados por Classes de PG A/B e C. Os padrões de ventos para Aracaju anteriormente citados acendem um alerta para esses grupos em todas as Classes de PG, a destacar os limites superiores que extrapolam os 10 km da análise a partir da Classe C. Essa característica garante uma previsibilidade ao padrão de dispersão. A proximidade com o oceano promove uma elevada umidade do ar na cidade, contribuindo

Figura 31 – Rosa dos Ventos para Aracaju-SE



Fonte: Autora

Tabela 15 – Exposição de indivíduos em faixas etárias de 0–14 anos e 50 a +70 anos de ambos os sexos sobre o recorte das plumas em níveis de dose para as cidades de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro

Nível de Dose (TEDE)	Aracaju		Nossa Senhora do Socorro	
	PG A/B	PG C	PG A/B	PG C
700 mSv	14.218	20.449	–	–
50 mSv	56.813	73.798	1.126	11.658
100 mSv	46.511	47.783	–	3.567

Nota: A ausência de valores na tabela se deve aos limites das plumas admitirem um caráter extrapolado, dificultando a tomada de decisão pela imprevisibilidade.

para a renovação das massas de ar. De maneira simultânea, o relevo predominantemente plano da cidade minimiza as barreiras físicas à circulação do ar, permitindo a propagação horizontal de contaminantes, caracterizando uma dispersão mais eficiente.

5 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo, buscaram responder às perguntas motivadoras: "Como otimizar a gestão de emergências nucleares em centros urbanos frente a incidentes?", "Quais zonas e grupos prioritários devem ser evacuados?", "Qual influência exerce a atmosfera dessa cidade?". O estudo demonstra que o conhecimento científico sobre a proteção radiológica local passa a ser significativamente mais robusto quando a modelagem física da pluma é enriquecida com a demografia dada pelo Censo 2022 do IBGE. Conclui-se que, para a região de Aracaju, a integração HotSpot-QGIS é a ferramenta mais eficaz para converter doses simuladas em planos de evacuação específicos. A hipótese inicial foi confirmada, sendo a análise com o QGIS possível de identificar, como se comporta os cenários de estabilidade atmosférica (Classes E/F), o raio de letalidade ($TEDE > 4 \text{ Sv}$) e a extensão das análises limitadas em 10 km, conforme apresentado como limitação no HotSpot.

A principal contribuição científica deste trabalho reside no estabelecimento de um protocolo de análise de vulnerabilidade para capitais litorâneas, como Aracaju, diante da larga discussão sobre a implementação de reatores SMRs. O diferencial deste trabalho reside na superação da descrição teórica pela aplicação prática de modelos radioepidemiológicos (BEIR V e VII) sobre um cenário real simulado e hipotético de alta densidade populacional e relevo plano, características que facilitam a propagação horizontal de contaminantes. Como perspectiva, este trabalho serve de base para futuras investigações que utilizem modelos de CFD para detalhar a microescala urbana, garantindo uma proteção ainda mais refinada à população possivelmente exposta.

6 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se que os resultados da análise usando o código *HotSpot Health Physics Code* sejam combinados com outros modelos, associados a dinâmica de fluidos computacional (CFD) assim como formas aplicadas sobre os dados demográficos e populacionais, na área afetada. A destacar a utilização de ferramentas que possibilitem análises mais fiéis quando a dispersão da pluma admitir distâncias maiores que 10 km da fonte. Em cidades onde as mudanças atmosféricas são frequentes, as ações protetoras tornam difícil a resolução e as análises por meio do software ficam limitadas. A associação de métodos permitiria uma análise aprofundada e fiel da dispersão de materiais radioativos para o meio ambiente, a destacar o cenário urbano, devido à sua complexidade de terreno e morfologia com edifícios, condições que influenciam diretamente o fluxo de ar. Possibilitando, assim, condições mais precisas do local de liberação e das características da cidade, como turbulência atmosférica, concentração, umidade e suas possíveis interações no ambiente simulado.

7 RECURSOS UTILIZADOS

- **Discovery Research** – Inteligência Artificial para a busca de referências bibliográficas. Disponível em: <https://discovery.researcher.life/>
- **Rabbit Research** – Inteligência Artificial para buscar referências bibliográficas. Disponível em: <https://www.researchrabbit.ai/>
- **BioRender** – Geração de imagens. Disponível em: <https://www.biorender.com>
- **Grammarly** – Correção e uso da gramática. Disponível em: <https://www.grammarly.com/>
- **Gemini** – Modificação de imagem da referência. Disponível em: <https://gemini.google.com/app>

REFERÊNCIAS

- 1 AGENCY, I. A. E. *Chernobyl: looking back to go forward*. [S.l.]: Vienna: IAEA, 2008.
- 2 CLEMONS J.; BLUMENBERG, A. The goiânia incident, the semiotics of danger, and the next 10,000 years. *Clinical Toxicology*, Philadelphia, v. 61, p. 551–558, 2023.
- 3 BEGICHEV, S. N. et al. Radioactive releases due to the Chernobyl accident. In: ROGERS, J. T. (Ed.). *Fission Product Processes in Reactor Accidents*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1990. p. 18.
- 4 International Atomic Energy Agency. *General Safety Requirements GSR Part 7: Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*. Vienna: IAEA, 2015.
- 5 WOLBARST, A. et al. Medical response to a major radiologic emergency: a primer for medical and public health practitioners. *Radiology*, v. 254, p. 660–677, 2010.
- 6 SHEKHAR, S. R.; SRINIVAS, C. V.; RAKESH, P.; DEEPU, R.; RAO, P. P.; BASKARAN, R.; VENKATRAMAN, B. Online nuclear emergency response system (ONERS) for consequence assessment and decision support in the early phase of nuclear accidents simulations for postulated events and methodology validation. *Progress in Nuclear Energy*, Elsevier, v. 119, p. 103177, 2020.
- 7 LIPOTI, J.; BENNETT, G. Recovery, resilience and reality: going beyond NCRP report no. 175, progress and possibilities. *Health Physics*, LWW, v. 114, n. 2, p. 176–181, 2018.
- 8 SHIN, H.; KIM, J. Development of realistic RDD scenarios and their radiological consequence analyses. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 67, p. 1516–1520, 2009.
- 9 TURNER, D. B. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- 10 PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*, London, v. 90, p. 33–491, 1961.
- 11 WILLIAMS, M. *Toxicological Profile for Cesium*. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004.
- 12 TAUHATA, L.; SALATI, I.; PRINZIO, R. D.; PRINZIO, A. R. D. *Radioproteção e dosimetria: fundamentos*. 10. ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.
- 13 ANVARI, A.; SAFARZADEH, L. Assessment of the total effective dose equivalent for accidental release from the Tehran research reactor. *Annals of Nuclear Energy*, v. 50, p. 251–255, 2012.
- 14 SADETZKI, S.; MANDELZWEIG, L. Childhood exposure to external ionising radiation and solid cancer risk. *British Journal of Cancer*, London, v. 100, p. 1021–1025, 2009.
- 15 WAKEFORD, R. The cancer epidemiology of radiation. *Oncogene*, v. 23, p. 6404–6428, 2004.

- 16 International Atomic Energy Agency. *IAEA-TECDOC-870: Methods for Estimating the Probability of Cancer from Occupational Radiation Exposure*. Vienna: IAEA, 1996.
- 17 National Research Council. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*. Washington, DC: National Academies Press, 2006.
- 18 WANG S.; ZHENG, X. W. J. Y. J. Numerical study on the gaseous radioactive pollutant dispersion in urban area from the upstream wind: Impact of the urban morphology. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 56, n. 6, p. 2039–2049, 2024.
- 19 Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Nota técnica DEA-016/2025: avaliação de pequenos reatores modulares para o sistema elétrico brasileiro*. Rio de Janeiro, 2025.
- 20 International Atomic Energy Agency. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. Vienna: IAEA, 2020.
- 21 GIFFORD, F. A. Atmospheric dispersion models for environmental pollution applications. In: *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses*. [S.l.]: American Meteorological Society, 1982. p. 35–58. ISBN 978-1-935704-23-2.
- 22 NuScale Power. *The NuScale Power Module™*. Acesso em: 24 abril 2026. Disponível em: <https://www.nuscalepower.com/products/nuscale-power-module>.
- 23 HOMANN, S. G. *HotSpot Health Physics Codes Version 3.1.2 User's Guide*. Livermore, 2020.
- 24 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades@: Aracaju — Sergipe*. Rio de Janeiro, 2025. Acesso em: 23 abril 2026. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/se/aracaju/panorama>.
- 25 CANET, L.; TAKADA, M.; YASUTAKA, T. Comparative qualitative and quantitative analysis of guidelines for nuclear accident recovery. *Radioprotection*, v. 59, n. 2, p. 69–79, 2024.
- 26 HARRISON, J.; BALONOV, M.; BOCHUD, F.; MARTIN, C.; MENZEL, H.; LOPEZ, P. O.; SMITH-BINDMAN, R.; SIMMONDS, J.; WAKEFORD, R. ICRP publication 147: use of dose quantities in radiological protection. *Annals of the ICRP*, SAGE Publications, London, England, v. 50, n. 1, p. 9–82, 2021.
- 27 ISAKSSON, M.; RAAF, C. L. *Environmental Radioactivity and Emergency Preparedness*. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- 28 CRICK, M. Nuclear and radiation safety: guidance for emergency response. *IAEA Bulletin*, v. 38, n. 1, p. 23–27, 1996.
- 29 DAUER, L. T. *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*. [S.l.]: LWW, 2005.
- 30 UNSCEAR. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2012 Report to the General Assembly, With Scientific Annexes A and B*. [S.l.]: UN, 2015.
- 31 FUNABASHI, H. Why the Fukushima nuclear disaster is a man-made calamity. *International Journal of Japanese Sociology*, John Wiley & Sons, Ltd, v. 21, p. 65–75, 2012. ISSN 0918-7545.

- 32 SMODIS, B. IAEA approaches to assessment of chemical elements in atmosphere. In: *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*. [S.l.]: Elsevier, 2003. v. 6, p. 875–902.
- 33 US Environmental Protection Agency. *PAG Manual: Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents*. Washington, DC, 2013.
- 34 GARRATT, J. R. Review: the atmospheric boundary layer. *Earth-Science Reviews*, v. 37, p. 89–134, 1994. ISSN 0012-8252.
- 35 LISBOA, H. d. M. *Controle da Poluição Atmosférica: Cap. 8 — Meteorologia e dispersão atmosférica*. 2014.
- 36 SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 1118947401.
- 37 STOLL, R.; GIBBS, J. A.; SALESKY, S. T.; ANDERSON, W.; CALAF, M. Large-eddy simulation of the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 177, p. 541–581, 2020. ISSN 1573-1472.
- 38 WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, CA: DCW Industries, 2006.
- 39 POPE, S. B. Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. *New Journal of Physics*, v. 6, p. 35, 2004. ISSN 1367-2630.
- 40 STOHL, A.; SEIBERT, P.; WOTAWA, G. The total release of xenon-133 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, Elsevier, v. 112, p. 155–159, 2012. ISSN 0265-931X.
- 41 PETERSEN, R. L.; RATCLIFF, M. A. SLAB/DEGADIS model predictions versus wind tunnel observations for homogeneous and heterogeneous roughness. In: *Proceedings of the 82nd A&WMA Annual Meeting*. Anaheim, CA, USA: [s.n.], 1989. v. 14.
- 42 HANNA, S. R.; BRIGGS, G. A.; HOSKER R. P., J. *Handbook on Atmospheric Diffusion*. [S.l.]: US Department of Energy, Office of Energy Research, 1982.
- 43 HEMOND, H. F.; FECHNER, E. J. *Chemical Fate and Transport in the Environment*. 3. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015.
- 44 COUNIHAN, J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 3, p. 197–214, 1969. ISSN 0004-6981.
- 45 YANG, L.; FANG, S.; ZHUANG, S.; CHEN, Y.; LI, X.; ZHANG, Q. Atmospheric ¹³⁷Cs dispersion following the Fukushima Daiichi nuclear accident: local-scale simulations using CALMET and LAPMOD. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 195, p. 110137, 2024. ISSN 0306-4549.
- 46 KARAM, P. A. Radiological terrorism. *Human and Ecological Risk Assessment*, Taylor & Francis, v. 11, p. 501–523, 2005. ISSN 1080-7039.
- 47 AGENCY, I. A. E. *Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment*. Vienna: IAEA, 2001. (Safety Reports Series, 19). ISBN 92-0-100501-6.

- 48 MEIT, M.; REDLENER, I.; BRIGGS, T. W.; KWANISAI, M.; CULP, D.; ABRAMSON, D. M. Rural and suburban population surge following detonation of an improvised nuclear device: a new model to estimate impact. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, Cambridge University Press, v. 5, p. S143–S150, 2011. ISSN 1935-7893.
- 49 CURZIO, R. C. *Modelo de Avaliação de Resiliência Local Sob Condições QBRN Aplicado a Cenários Realistas Utilizando Simulação Computacional*. Tese (Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Defesa)) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2025.
- 50 VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. [S.l.]: Pearson Education, 2007.
- 51 BRIGGS, G. *Diffusion estimation for small emissions: Contribution no. 79*. Oak Ridge, TN, 1973.
- 52 ANDRADE, E. R.; STENDERS, R.; CASTRO, M. S. C.; SANTOS, C. V. V.; PRAH, M.; SILVA, A. X. Evaluation of cancer risk after a release from a hypothetical nuclear reactor steam generator tube rupture accident (SGTR). *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 136, p. 107023, 2020. ISSN 0306-4549.
- 53 ANDRADE, E. R.; REIS, A. L. Q.; STENDERS, R. M.; VITAL, H. C.; REBELLO, W. F.; SILVA, A. X. Evaluating urban resilience in a disruptive radioactive event. *Progress in Nuclear Energy*, Elsevier, v. 147, p. 104218, 2022. ISSN 0149-1970.
- 54 International Commission on Radiological Protection. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60*. Oxford: Pergamon Press, 1991. v. 21. (Annals of the ICRP, 1-3).
- 55 International Commission on Radiological Protection. *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: ICRP Publication 30, Part 2*. Oxford: Pergamon Press, 1981. v. 4. (Annals of the ICRP, 3-4).
- 56 International Commission on Radiological Protection. *Limits for intakes of radionuclides by workers: ICRP Publication 30, Part 1*. Oxford: Pergamon Press, 1979. v. 3. (Annals of the ICRP, 1-4).
- 57 International Commission on Radiological Protection. *Limits for intakes of radionuclides by workers: ICRP Publication 30, Part 1 including Addendum*. Oxford: Pergamon Press, 1979. v. 2. (Annals of the ICRP, 3-4).
- 58 International Commission on Radiological Protection. *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection: ICRP Publication 66*. Oxford: Pergamon Press, 1994. v. 24. (Annals of the ICRP, 1-3).
- 59 International Commission on Radiological Protection. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103*. Oxford: Pergamon Press, 2007.
- 60 ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- 61 International Commission on Radiological Protection. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Oxford: Pergamon Press, 1991. 211 p.

- 62 Brasil. Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Resolução CNEN nº 323, de 2 de abril de 2024: Aprova a norma CNEN NN 3.01 – Diretrizes Fundamentais de Proteção Radiológica*. Rio de Janeiro, 2024. Acesso em: 24 abril 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/NormaCNENNN3.01.pdf>.
- 63 International Commission on Radiological Protection. *Implications of Commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable*. [S.l.]: Pergamon, 1973. v. 22.
- 64 U.S. Environmental Protection Agency. *Federal Guidance Report No. 15: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil*. Washington, DC, 2025. Revised edition. Updates and replaces Federal Guidance Report No. 12.
- 65 BioRender. *BioRender for Science*. 2026. Acesso em: 9 maio 2026. Disponível em: <https://www.biorender.com>.
- 66 SILVA R.; REIS, A. S. R.; ANDRADE, E. Radiological consequences modelling for a land based operations environment. *Defence Science Journal*, v. 71, p. 470–475, 07 2021.
- 67 ANDRADE E. AND REIS, A.; STENDERS, R.; VITAL, H.; REBELLO, W.; SILVA, A. Evaluating urban resilience in a disruptive radioactive event. *Progress in Nuclear Energy*, v. 147, p. 104218, 05 2022.
- 68 TSOULFANIDIS, N.; LANDSBERGER, S. *Measurement and Detection of Radiation*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- 69 Professional Committee of Military Radiation Medicine; Professional Committee of Military Hematology. Expert consensus on hematopoietic reconstruction strategies for radiation injury. *Journal of Third Military Medical University*, v. 43, n. 1, p. 1–11, 2021.
- 70 SILVA, V. W. L.; PROFETA, W. H. S.; CURZIO, R. C.; SANTOS, A.; BRUM, T.; ANDRADE, E. R. The convergence approach may be critical to improving early situational awareness in hostile radioactive environments. *Journal of Environmental Radioactivity*, Elsevier, v. 274, p. 107413, 2024. ISSN 0265-931X.
- 71 International Commission on Radiological Protection. *Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers: Replacement of ICRP Publication 54: ICRP Publication 78*. Oxford: Pergamon Press, 1997. v. 27. (Annals of the ICRP, 3-4).
- 72 Nuclear Regulatory Commission (NRC). *Glossary: Lethal Dose (LD)*. 2024. Acesso em: 06 abril 2026. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/lethal-dose-ld>.
- 73 National Research Council. *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V*. Washington, DC: National Academy Press, 1990. 432 p.
- 74 SHAKER, A.; ABDELSALAM, A.; SABAH, N. *Biological Radiation Hazards and Risk Estimation: 9th Lecture*. Hillah. 6 p. Acesso em: 16 abril 2026. Disponível em: <https://energy.uomus.edu.iq/uploads/lectures/29/a63fa3256b53451db3421896907e1482.pdf>.
- 75 MUSHAK, P. Limits to chemical hormesis as a dose–response model in health risk assessment. *Science of The Total Environment*, v. 443, p. 643–649, 2013. ISSN 0048-9697.

- 76 CALABRESE, E. J. Hormesis: from marginalization to mainstream: A case for hormesis as the default dose-response model in risk assessment. *Toxicology and Applied Pharmacology*, v. 197, n. 2, p. 125–136, 2004. ISSN 0041-008X.
- 77 DARIO, S.; PEREZ, R. *Pequenos Reatores Modulares (SMRs) no Brasil: uma alternativa em avaliação para o setor elétrico*. 2023. Acesso em: 30 abril 2026. Disponível em: <https://exame.com/esg/pequenos-reatores-modulares-smrs-no-brasil-uma-alternativa-em-avaliacao-para-o-setor-eletrico/>.
- 78 SANT'ANNA, V. R. *Avaliação preliminar da dispersão atmosférica e risco radiológico, suas implicações para a saúde pública e seu impacto econômico*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Defesa)) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2025.
- 79 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report*. New York: United Nations, 2011.
- 80 LEE, S.; KIM, J.; HAN, S. Review of health effects models for level 3 PSA. *Korean Nuclear Society*, may 2016.
- 81 DONOVAN, E. M.; JAMES, H.; BONORA, M.; YARNOLD, J. R.; EVANS, P. M. Second cancer incidence risk estimates using BEIR VII models for standard and complex external beam radiotherapy for early breast cancer. *Medical Physics*, Wiley Online Library, v. 39, p. 5814–5824, 2012. ISSN 0094-2405.
- 82 US Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee. *Report of the US Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee*. [S.l.], 1984.
- 83 NuScale Power, LLC. *NuScale Power Module (NPM): Technology Summary*. Portland, OR, 2020.
- 84 ENERGY, S. *Pequenos reatores podem “reviver” o uso da energia nuclear?* 2024. Acesso em: 30 abril 2026. Disponível em: <https://simpleenergy.com.br/pequenos-reatores-podem-reviver-o-uso-da-energia-nuclear/>.
- 85 RISKS, M. G. *Pequenos reatores modulares: o futuro do setor energético nuclear?* 2022. Acesso em: 30 abril 2026. Disponível em: <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riscos-seguros/artigos/pequenos-reatores-modulares-o-futuro-do-setor-energetico-nuclear/>.
- 86 MARQUES, A. S. *Avaliando o potencial dos Small Modular Reactors (SMRs) para a indústria nuclear*. 2019. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/avaliando-o-potencial-dos-small-modular-reactors-smrs-para-a-industria-nuclear/>.
- 87 United States Department of Energy. *Benefits of Small Modular Reactors (SMRs)*. Washington, DC. Acesso em: 14 maio 2026. Disponível em: <https://www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs>.
- 88 International Atomic Energy Agency. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. 2024. ed. Vienna: IAEA, 2024.
- 89 NuScale Power. *Assessment of NuScale Steam Production Rates for Industrial Applications*. Corvallis, 2024. 15 p.

- 90 MACEDO M. F. M., R. A. L. D. Vehicle atmospheric pollution evaluation using aermod model at avenue in a brazilian capital city. *Air Quality, Atmosphere Health*, v. 13, p. 309–320, 2020.
- 91 THAUL, S.; O'MAONAIGH, H. *Potential Radiation Exposure in Military Operations: Protecting the Soldier Before, During, and After*. Washington, DC: National Academies Press, 1999.
- 92 ECKERMAN, K. F.; WOLBARST, A. B.; RICHARDSON, A. C. B. *Limiting values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion: Federal Guidance Report No. 11*. 1988.
- 93 ECKERMAN, K. F.; RYMAN, J. C. *Federal Guidance Report No. 12: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil*. Washington, DC, 1993. Prepared by Oak Ridge National Laboratory.
- 94 CURZIO, R. C. et al. Modelagem computacional da dispersão atmosférica aplicada a um reator modular de pequeno porte. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 9, n. 1, p. 1–21, 2021. ISSN 2319-0612.
- 95 International Commission on Radiological Protection. *Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations: ICRP Publication 109*. Oxford: Elsevier, 2009. v. 39. 115 p. (Annals of the ICRP, 1).
- 96 International Commission on Radiological Protection. *ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context: ICRP Publication 118*. Ottawa: Elsevier, 2012. v. 41. 322 p. (Annals of the ICRP, 1/2).
- 97 International Atomic Energy Agency. *Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor*. Vienna, 2013.
- 98 International Atomic Energy Agency. *Classification, Assessment and Prognosis During Nuclear Power Plant Emergencies*. Vienna, 2013.
- 99 International Atomic Energy Agency. *Operations Manual for IAEA Assessment and Prognosis during a Nuclear or Radiological Emergency*. Vienna, 2019.
- 100 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). *Meteograma – Aracaju/SE*. Brasília, 2026. Acesso em: 23 abril 2026. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>.