

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

KAROLINA PEREIRA DA SILVA COSTA

**RISCO DE INCIDÊNCIA DE CÂNCER DE PULMÃO POR EXPOSIÇÃO
RADIOLÓGICA EM CENÁRIOS RDD**

Rio de Janeiro

2018

**RISCO DE INCIDÊNCIA DE CÂNCER DE PULMÃO POR EXPOSIÇÃO
RADIOLÓGICA EM CENÁRIOS RDD**

KAROLINA PEREIRA DA SILVA COSTA

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

Orientadores: Prof. Dr. Zelmo Rodrigues de Lima

Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade

Rio de Janeiro

2018

COST Costa, Karolina Pereira da Silva

Risco de incidência de câncer de pulmão por exposição radiológica em cenários RDD / Karolina Pereira da Silva Costa. Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2018.

XIV(pré-textuais), 61p. (textuais) : il.; 31 cm.

Orientadores: Zelmo Rodrigues de Lima e Edson Ramos de Andrade

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2018

1. Meio ambiente. 2. Convergência. 3. Contaminação. 4. Custo. 5. Risco.

CDD 614.5999424

**RISCO DE INCIDÊNCIA DE CÂNCER DE PULMÃO POR EXPOSIÇÃO
RADIOLÓGICA EM CENÁRIOS RDD**

KAROLINA PEREIRA DA SILVA COSTA

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

Aprovada por:

Dr. Zelmo Rodrigues de Lima, D.Sc.

Dr. Edson Ramos de Andrade, D.Sc.

Dr. Paulo Victor R. Carvalho, D.Sc.

Dr. Tercio Brum, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

**A Deus, pela oportunidade
do desenvolvimento
intelectual e a minha
família que é meu alicerce e
suporte.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e avós, pelo amor incondicional, pela dedicação e pelo apoio em todos os momentos da minha vida. A minha avó Clemilda, onde estiver, sei que está vibrando por mais esta vitória.

A minha irmã, que sempre torceu pelas minhas conquistas.

Ao Meu tio Augusto e Ronaldo por todo apoio e incentivo.

Ao IEN, por permitir e incentivar esta pesquisa.

Ao amigo e orientador, professor Edson Ramos de Andrade, pela boa vontade, disponibilidade, confiança, incentivo e paciência em me orientar.

Ao orientador, professor Zelmo Rodrigues de Lima, pelo apoio e direcionamento desde o início desta pós-graduação.

Aos amigos de turma, pelos momentos e dificuldades compartilhados durante o curso.

Ao amigo Ramiro, por toda disposição em esclarecer os cálculos.

À Força Aérea Brasileira, por me proporcionar oportunidades ímpares em minha formação profissional e acadêmica, em especial ao Brigadeiro Médico Eduardo Serra Negra Camerini, que é um verdadeiro amigo e mestre em minha vida profissional.

A minha sogra Rosângela, por compartilhar meus momentos de angústias e alegrias.

Em especial ao meu esposo Rafael e meu filho Lorenzo, pelo companheirismo, paciência e compreensão por todos os momentos em que precisei estar ausente para ir em busca dos nossos objetivos.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que esta dissertação pudesse ser concluída.

“O que há de nobre e elevado no domínio da inteligência emana de uma causa eterna, viva e pensante. Quanto mais largo é o vôo do pensamento para essa causa, tanto mais alto ele paira, tanto mais radiosas também são as claridades entrevistas, mais inebriantes as alegrias sentidas, mais poderosas as forças adquiridas, mais geniais as inspirações!”
(Léon Denis)

RESUMO

O complexo cenário envolvendo liberação de material radioativo para o meio ambiente pode levar à exposição da população e a sérios comprometimentos com seus desdobramentos. Neste contexto, uma metodologia que seja capaz de oferecer informações básicas úteis, com o mínimo de informação proveniente do cenário, para avaliação de risco imediato e futuro é de relevância. Além disso, a otimização de radioproteção na emergência também se faz necessária a fim de reduzir doses nos indivíduos e minimizar custos de detrimento na operação.

Para este trabalho foi considerada a simulação de um dispositivo de dispersão radiológica (RDD) envolvendo Amerício-241, acoplando os resultados do software HotSpot às equações epidemiológicas do BEIR V (*Biological Effects of Ionizing Radiation V*), gerando uma avaliação de risco de incidência de câncer de pulmão. Em seguida, foi calculado o impacto no custo de detrimento e sugerido medidas de proteção os quais servirão de apoio ao processo decisório de gerenciamento do quadro de emergência a fim de otimizar proteção, custo e tempo.

Palavras-chaves: Meio-ambiente, Contaminação, Convergência, Custo, Risco.

ABSTRACT

The complex scenario involving the release of radioactive material into the environment can lead to exposure of the population and serious compromising with its developments. In this context, a methodology that is able to offer useful information, with the minimum of provided information of the scenario, for immediate and future risk assessment of relevance. In addition, an optimization of on-time radioprotection, in addition to a need to reduce doses, and minimize costs of destruction in operation.

For this work, a simulation of a radiological dispersion device (RDD) involving Americium-241, coupling the results of the HotSpot software to the epidemiological equations of BEIR V (Biological Effects of Ionizing Radiation V), generating a risk assessment of lung cancer incidence. Then the impact on the cost of detriment was calculated and suggested protective measures which will support the decision-making process of emergency management in order to optimize protection, cost and time.

Keywords: Environment, Contamination, Convergence, Coast, Risk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Espectro eletromagnético da radiação	18
Figura 3.2: Categorização simplificada das radiações	19
Figura 3.3: Esquema simplificado das prováveis formas de decaimento para se alcançar estabilidade energética por emissão de energia nuclear	20
Figura 4.1: Metodologia de Convergência aplicada ao cenário RDD	36
Figura 4.2: Perfis de temperatura vertical em diferentes condições atmosféricas	43
Figura 5.1: Deposição da radiação no solo x distância	51
Figura 5.2: TEDE em função do Vento	51
Figura 5.3: ERR: (A) em 6 meses após a exposição, (B) 1 ano, (C) 5 anos, (D) 10 anos e (E) 30 anos	52
Figura 5.4: PC: (A) em 6 meses após a exposição, (B) 1 ano, (C) 5 anos, (D) 10 anos e (E) 30 anos	53
Figura 5.5: Pluma de delimitação das isodoses	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Fontes radioativas comerciais mais significativas	32
Tabela 4.1: Dados de entrada no software HotSpot	34
Tabela 4.2: Áreas de Controle Operacional	37
Tabela 4.3: Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F	41
Tabela 4.4: Valores típicos de profundidade da camada de mistura para diferentes classes de estabilidades	43
Tabela 4.5: Ação de Proteção e limites	48
Tabela 5.1: Doses de radiação de acordo com a distância do RDD	50
Tabela 5.2: Agrupamento de isodoses	55
Tabela 6.1: Custo de detrimento do cenário.....	59

LISTA DE SIGLAS

APP	Análise Preliminar de Perigo
BEIR	Biologic Effect of Ionizing Radiation
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
EPA	Environmental Protection Agency
ERR	Excesso de Risco Relativo
FGR	Federal Guidance Report
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRP	International Commission on Radiation Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
ITDB	Incident and Trafficking Database
LET	Transferência Linear de Energia
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
LSS	Life Span Study
NCR	Nuclear Regulatory Commission
PC	Probabilidade de Causalidade
RDD	Radiological Dispersive Device
SAR	Síndrome Aguda da Radiação
SIU	Sistema Internacional de Unidades
TEDE	Doses Totais Equivalentes Efetivas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1 RADIAÇÃO IONIZANTE	18
3.2 ATIVIDADE	20
3.3 MEIA-VIDA E CONSTANTE DE DECAIMENTO	20
3.4 RADIOPROTEÇÃO	21
3.4.1 Dose Absorvida	21
3.4.2 Dose Absorvida Comprometida	22
3.4.3 Dose Equivalente	22
3.4.4 Dose Equivalente em um Tecido	23
3.4.5 Dose Efetiva	23
3.4.6 Dose Total Equivalente Efetiva	24
3.4.7 Dose Coletiva	24
3.5 AVALIAÇÃO DE RISCO	24
3.6 DETRIMENTO	25
3.7 RISCO DE EFEITO BIOLÓGICO INDUZIDO PELA RADIAÇÃO IONIZANTE	25
3.8 RISCOS DE UMA BOMBA SUJA	25
3.9 O AMERÍCIO	26
3.9.1 Meio ambiente	26

3.9.2 Fisiologia	27
3.9.3 Efeitos na Saúde	28
3.9.4 Mecanismo de Ação	29
3.9.5 Mecanismos de Toxicidade	29
3.9.6 Potencial para exposição humana	30
3.10 LIBERAÇÃO DO MATERIAL RADIOATIVO PARA A ATMOSFERA	30
3.11 FONTES RADIOATIVAS	31
3.12 CÂNCER	32
4. METODOLOGIA	34
4.1 CÓDIGO COMPUTACIONAL HOTSPOT	37
4.1.1 Modelo Gaussiano	39
4.1.2 Deposição Seca	40
4.1.3 Ressuspensão	40
4.1.4 Classificação de Estabilidade Atmosférica	41
4.1.5 Profundidade da Camada de Mistura	42
4.1.6 Perfil de Temperatura Vertical	43
4.1.7 Tempo de Amostragem	44
4.2 BEIR V	44
4.2.1 Excesso de Risco Relativo	45
4.2.2 Probabilidade de Causalidade	45
4.3 CUSTO DE DETRIMENTO	46
4.4 INTERVENÇÕES EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA	47
5. RESULTADOS	50
6. DISCUSSÃO	56

7. CONCLUSÃO	60
8. PERSPECTIVAS FUTURAS	61
9. REFERÊNCIAS	62
ANEXO 1: Dados fornecidos pelo Software Hotspot	66

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que utiliza a energia nuclear em muitas etapas da sua atividade tanto industrial quanto de serviços, que vão desde a garantia da qualidade na produção, passando pela medicina até a geração de energia em usinas nucleares. Esta larga escala de utilização obriga as autoridades e a sociedade a buscar instrumentos que garantam a segurança das operações e a pensar nos cuidados necessários em caso de acidentes.

Dentre as prováveis causas de contaminação radiológica ambiental, com consequências deletérias sobre a população afetada, figura um importante mecanismo de dispersão, conhecido como RDD (*Radiological Dispersive Device*), que é um dispositivo relativamente simples que não requer conhecimento profundo de tecnologia nuclear para sua montagem e uso, sendo, entretanto, necessário acesso ao material nuclear que o compõe. Uma discussão ao acesso ao material que é ingrediente de um RDD, também conhecido como Bomba Suja (do inglês, *Dirty Bomb*), foge ao escopo do trabalho e não será tratado no texto.

Uma pequena quantidade de material radioativo pode ser espalhada sobre uma área para causar danos, interrupção de atividades e contaminação ambiental. A explosão de um RDD, entretanto, não é destinada a produzir uma quantidade considerável de danos físicos às construções, embora cenários de destruição física possam ser previstos nas regiões de vizinhança do local de explosão (hotSpot). A extensão dos danos e da área de contaminação provocada pela explosão de um RDD tem dependência com algumas importantes variáveis como: (a) termo-fonte, (b) classe de estabilidade atmosférica local e (c) quantidade e tipo do explosivo utilizado. Este tipo de incidente pode potencialmente paralisar uma cidade ou estado, infligir significativo impacto econômico, político e social (ROSOFF & VON WINTERFELDT, 2007), cuja magnitude pode depender de fatores tanto técnicos quanto políticos e sociais. Na literatura, embora não muito frequente, se pode acessar trabalhos que relacionem a dispersão radiológica provocada por um RDD com a distribuição populacional para prever o impacto econômico de longo prazo (ROTHER et al., 2016).

Dentre as consequências da exposição humana e ambiental a campos intensos de radiação ionizante figuram a capacidade de provocar interdição de grandes áreas por longos períodos e a ameaça à Saúde Pública e aos trabalhadores da resposta. Normalmente, cenários envolvendo emergências radiológicas ou nucleares têm como característica um alto grau de desinformação inicial sobre as fontes de radiação, suas localizações no terreno, bem como a capacidade de migração ambiental destes contaminantes para diversos compartimentos.

A classe de problemas estudado neste trabalho é recente e se situa na fronteira do conhecimento em avaliação e gerência de risco para a resposta a emergências radiológicas e nucleares.

A priori o atendimento de resposta feito por equipes altamente especializadas fica comprometido pela falta de informações iniciais sobre o cenário em desenvolvimento. Neste contexto, uma metodologia que seja capaz de oferecer informações básicas úteis, com o mínimo de informação proveniente do cenário, para avaliação de risco imediato e futuro com efeito sobre a equipe de resposta e o público, torna-se de grande valor para o processo decisório.

Este trabalho apresenta proposta de desdobramento de um estudo sobre o desenvolvimento da avaliação de risco à saúde humana convergindo capacidades independentes de plataformas computacionais e estatísticas epidemiológicas com vistas ao apoio ao processo decisório em situação de emergência.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar uma metodologia de convergência e análise de consequência sobre o desenvolvimento de câncer de pulmão decorrente de um cenário RDD.

2.2 Objetivos específicos

- a) Utilizar metodologia de convergência reunindo dados do software Hotspot para otimização do processo decisório nas medidas de proteção urgentes;
- b) Estimar o risco de indução de câncer de pulmão no modelo de Excesso de Risco Relativo (ERR) ajustado para o tumor sólido, a partir de dados de saída do software HotSpot e modelo bioestatístico BEIR V; e
- c) Estimar o custo de detrimento da operação emergencial por meio do coeficiente monetário e cálculo de doses coletivas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RADIAÇÃO IONIZANTE

Radiação pode ser definida como a propagação de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas subatômicas no espaço livre ou em um meio material (VALVERDE, LEITE, MAURMO, 2010). Entende-se por processos radioativos os ajustes ocorridos no núcleo atômico ou em camadas eletrônicas, ou ainda as interações que demandem subprocessos de estabilização com emissão de energia (TAUHATA, 2013).

Didaticamente, em radioproteção, as radiações podem ser divididas em não ionizantes e ionizantes. Radiações não ionizantes são aquelas com frequências iguais ou abaixo daquelas dos raios ultravioleta ($\approx 10^{15}$ a 10^{16} Hz), enquanto que as radiações ionizantes possuem frequências mais elevadas. As radiações ionizantes podem ainda ser definidas como aquelas que apresentam energia entre 10 e 33 eV (KNOLL, 1999). A partir dessa faixa e energia, experimentos mostram que a maior parte dos átomos ou moléculas simples (compostos elementares de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio, abundantes em meio biológico) podem ter seus elétrons, de camadas mais externas, ejetados (BIRAL, 2002). A energia de ionização da molécula de água, principal constituinte biológico da vida na Terra é de, aproximadamente, 12,4 eV (TAUHATA, 2013). Na figura 3.1, pode-se ver um esboço da distribuição de frequências de acordo com o tipo de radiação.

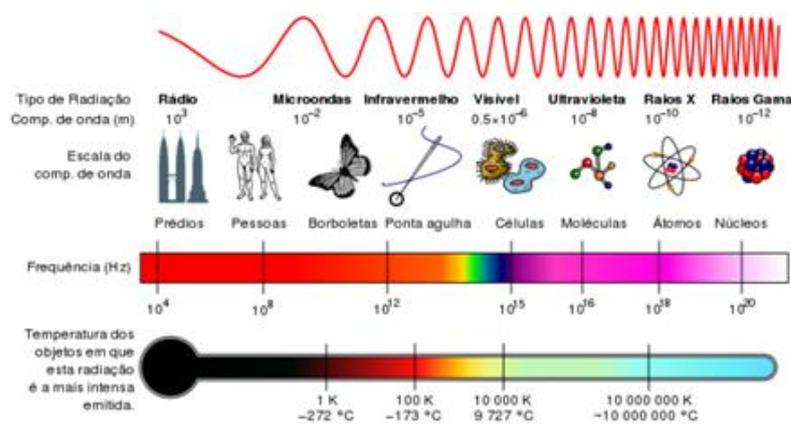


FIG.3.1 Espectro eletromagnético da radiação.

Fonte: VILLATE, 2013

O termo ionizante se dá pela produção de íons no meio de propagação, logo, é possível dizer que a radiação ionizante é capaz de produzir íons em um meio, diferentemente da radiação não ionizante.

A radiação ionizante pode ser ainda subdividida em direta e indiretamente ionizante. Durante o processo em que a energia é transferida de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que possuem carga elétrica, como no caso de elétrons, fragmentos de fissão e partículas alfa, têm sua atuação dada, principalmente, por seu campo elétrico, transferindo sua energia para diversos átomos do meio simultaneamente, sendo assim denominadas radiações diretamente ionizantes. As radiações que não apresentam carga elétrica associada (nêutrons e fótons) têm forma distinta de interação com a matéria e são denominadas radiações indiretamente ionizantes. Ao interagirem, transferindo energia para os elétrons do meio, provocam ionizações (TAUHATA, 2013). O esquema da figura 3.2 mostra uma categorização simplificada das radiações.

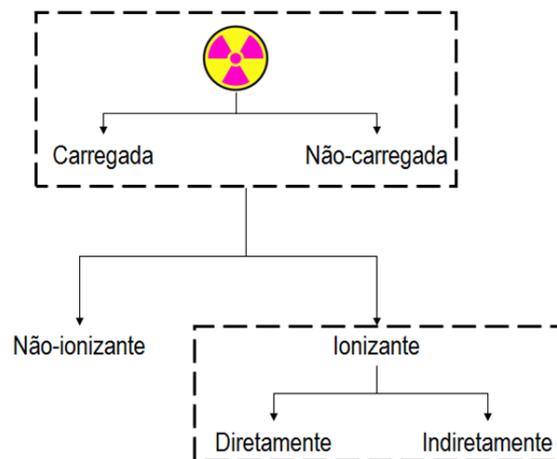


FIG.3.2: Categorização simplificada das radiações

Fonte: ANDRADE, 2010

Os tipos de radiações ionizantes mais conhecidos são os raios X, usados em equipamento radiológico para fins médicos, como por exemplo, no diagnóstico e tratamento. A radiação alfa (α), beta (β) e gama (γ) produzidas por núcleos de átomos instáveis são outros tipos de radiações ionizantes. A radiação ionizante penetra de acordo com seu tipo e energia. Enquanto partículas alfa podem ser bloqueadas por uma folha de papel, partículas beta requerem alguns milímetros de, por exemplo, alumínio, para bloqueá-las, enquanto a radiação gama de alta energia requer materiais densos para bloqueá-la, como por exemplo, chumbo ou

concreto. A figura 3.3 apresenta um esquema simplificado das prováveis formas de decaimento para se alcançar estabilidade energética por emissão de energia nuclear.

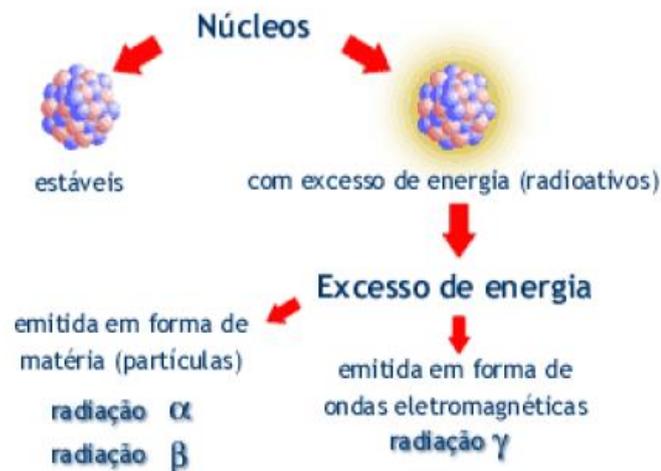


FIG.3.3: Esquema simplificado das prováveis formas de decaimento para se alcançar estabilidade energética por emissão de energia nuclear

Fonte: CNEN: Programa de Integração CNEN, 2003.

3.2 ATIVIDADE

A atividade (A) de determinado material radioativo pode ser definida como o número de desintegrações nucleares por unidade de tempo, grandeza dada por $A = dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt (CNEN, 2011). A unidade no Sistema Internacional de Unidades (SIU) é denominada becquerel (Bq) e representa uma desintegração por segundo (dps). Anteriormente, a unidade histórica estabelecida para a atividade de um radionuclídeo era o curie (Ci). Por definição, o curie é igual a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo em 1,0 g de Ra-226. Portanto, tem-se que: $1,0 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

3.3 MEIA-VIDA E CONSTANTE DE DECAIMENTO

Entende-se por meia-vida o período necessário para que 50% dos átomos inicialmente presentes em uma amostra representativa de um radionuclídeo sofra decaimento. A constante de decaimento pode ser descrita como a probabilidade de decaimento por unidade de tempo.

No entanto, há estudos que apontam a possibilidade de a meia-vida não ser constante (FISCHBACH et al., 2012).

3.4 RADIOPROTEÇÃO

A Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (*International Commission on Radiation Units and Measurements - ICRU*), que define as grandezas físicas básicas e as grandezas operacionais, e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection - ICRP*), que limita as doses e define as grandezas usadas para indicar o risco à saúde humana devido à radiação ionizante, são as duas comissões encarregadas da padronização e organização das medidas de radioatividade quanto à descrição da interação da radiação com a matéria e a quantificação dos seus efeitos. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é a instituição brasileira que, com base nas publicações apresentadas pela ICRU e ICRP, elabora as normas para o funcionamento de atividades nucleares no Brasil. A publicação número 103 de 2007 da ICRP recomenda três grandezas de proteção radiológica principais: (a) dose absorvida, (b) dose equivalente em órgão ou tecido e (c) dose efetiva.

Dois tipos de grandezas são especificamente definidos para uso em proteção radiológica: (a) as grandezas limitantes, definidas pela ICRP e são usadas para indicar o risco à saúde humana devido à exposição a radiação ionizante, e (b) as grandezas operacionais, as quais são definidas pela ICRU e levam em consideração as atividades de radioproteção.

As grandezas de proteção radiológica ou de limitação de risco da ICRP são importantes e utilizadas para indicar o risco à saúde humana devido a radiação ionizante.

As definições mais importantes para este trabalho de pesquisa são: (a) dose absorvida, (b) dose equivalente, (c) dose efetiva, (d) dose total efetiva e (e) dose coletiva e (f) exposição.

3.4.1 Dose Absorvida (D)

É definida como a energia média ($d\epsilon$) depositada pela radiação por unidade de volume de matéria com massa (dm), ou seja, $D = d\epsilon/dm$ (CNEN, 2011). De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SIU), sua unidade é o joule por quilograma (J/kg), o gray (Gy).

3.4.2 Dose Absorvida Comprometida

É o valor da integral, no tempo, da taxa de dose absorvida num particular tecido ou órgão, que será recebida por um indivíduo após a incorporação de material radioativo em seu corpo, no tempo, por um período τ após a incorporação.

A incorporação pode ser feita por ingestão, inalação, injeção ou penetração através de ferimentos. O período de contagem τ , normalmente utilizado, é de 50 anos para adultos e de até 70 anos para crianças (TAHUATA, 2006). A dose absorvida comprometida é expressa por:

$$D(t) = \int_t^{t_0} \frac{dD(t)}{dt} dt \quad (1)$$

Onde, onde t_0 é o instante de incorporação, $dD(t)/dt$ é a taxa de dose absorvida e t é o tempo transcorrido desde a incorporação das substâncias radioativas.

3.4.3 Dose Equivalente (H)

Quando um ser humano é exposto a baixas doses de radiação, efeitos latentes tais como tumores, podem resultar de modificação permanente das células, estes efeitos são de natureza estocástica. Quando exposto a doses mais elevadas de radiação as células são mais propensas a morrer, efeitos observados acima deste limiar são determinísticos e podem resultar na síndrome aguda da radiação (SAR), comumente conhecida como doença da radiação (CDC, 2003).

Como os efeitos da radiação podem variar com a qualidade (tipo e energia) da radiação, para uma mesma dose absorvida, foi necessário criar um conceito que proporcionasse comparar os efeitos devido aos diferentes tipos de radiação. Assim a exposição a diferentes tipos tem efetividades diferentes e que podem ser mensuradas. Para considerar isto, foi introduzida a grandeza dose equivalente ou equivalente de dose H, que é obtida multiplicando-se a dose absorvida (D) pelo fator de qualidade (Q), ou seja, (TAUHATA, 2006):

$$H = D \cdot Q \quad (2)$$

A dose equivalente é expressa em J.kg^{-1} no Sistema Internacional de Unidades (SIU). Para evitar confusão com o conceito de dose absorvida, a unidade especial para a dose equivalente recebe o nome de *sievert* (Sv).

O fator de qualidade Q é adimensional e constitui um fator de peso proveniente da simplificação dos valores da Eficácia Biológica Relativa (RBE) dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico a baixas doses. Na equivalência, as diferenças entre as radiações foram expressas pelos diferentes valores de LET.

3.4.4 Dose Equivalente em um Tecido (H_T)

A dose equivalente em um órgão ou tecido é a dose absorvida D média em um tecido específico T , multiplicada pelo fator de qualidade Q da radiação R , expressa por:

$$H_T = D_T \cdot Q \quad (3)$$

onde, Q é o fator de qualidade da radiação e D_T é a dose absorvida no tecido T . (TAUHATA, 2014).

3.4.5 Dose Equivalente Efetiva (Effective dose equivalent, H_E , ICRP 26)

Também denominada Dose Equivalente de Corpo Inteiro, o conceito de dose efetiva nasceu da necessidade de quantificar a dose no corpo considerando a radiosensibilidade de cada órgão, de forma a relacioná-la ao risco, que é a base da proteção radiológica. Esta grandeza denomina-se dose efetiva e é definida pela relação:

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad (4)$$

Onde, H_T é a dose equivalente no tecido e w_T é o fator de peso de ponderação do tecido T ($\sum_T w_T = 1$) (ICRP 103, 2007). Os valores de w_T estão associados à radiosensibilidade do órgão à radiação. No Sistema Internacional de Unidades, a dose efetiva é expressa em *sievert* (Sv).

3.4.6 Dose Total Equivalente Efetiva (*TOTAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT*– TEDE)

A TEDE pode ser definida como a soma das doses efetivas (exposições externas) e a dose equivalente efetiva comprometida (exposições internas) (U.S. NRC, 2014).

Considera todas as vias que o indivíduo foi exposto, seja por inalação, submersão, ressuspensão ou deposição no solo.

3.4.7 Dose Coletiva

Segundo TAUHATA (2013), a dose coletiva é a expressão efetiva total de radiação recebida por uma população ou grupo de pessoas. É utilizada para avaliar o quanto uma determinada prática com uso de radiação ionizante expõe um grupo específico da população, ou de indivíduos ocupacionalmente expostos, num determinado período ou localidade. Representa o produto do número de indivíduos expostos pelo valor médio da distribuição de dose efetiva nesses indivíduos. A dose coletiva é expressa em pessoa \times sievert (Sv). De acordo com a CNEN (CNEN, 2011), nas avaliações quantitativas de otimização, o valor do coeficiente monetário por unidade de dose coletiva não deve ser inferior, em moeda nacional corrente, ao valor equivalente a US\$ 10.000,00 (dez mil dólares americanos) por unidade de dose coletiva por indivíduo, ou seja, US\$ 10.000,00/pessoa \times Sv.

3.5 AVALIAÇÃO DE RISCO

A qualidade ambiental e os riscos constituem-se uma das mais importantes preocupações da sociedade moderna. Os elementos motivadores dessa priorização são o impacto potencial do desenvolvimento tecnológico e as mudanças no estilo de vida e também o aumento da percepção para os perigos à saúde e segurança.

Conforme a Técnica de Análise Preliminar de Perigo (APP), proveniente do programa de segurança do exército americano, uma avaliação de risco é constituída, em geral, de quatro etapas básicas: identificação do perigo, avaliação da exposição, avaliação do risco e gerenciamento do risco (ARAUJO et al., 2001).

3.6 DETRIMENTO

O conceito de detrimento, utilizado em proteção radiológica envolve a combinação da probabilidade de ocorrência, severidade (gravidade) e tempo de manifestação de um determinado dano. Ele é a estimativa do prejuízo total que eventualmente seria experimentado por um grupo ou pessoa expostos à radiação, inclusive seus descendentes (TAUHATA, 2013).

3.7 RISCO DE EFEITO BIOLÓGICO INDUZIDO PELA RADIAÇÃO IONIZANTE

Para TAUHATA (2013) o conceito de risco é muito amplo, pois pode estar associado simplesmente à probabilidade de ocorrência de determinado efeito biológico de qualquer tipo, induzido pela radiação ionizante ou, frequentemente, probabilidade de efeitos sérios ou letais, particularmente a morte por câncer.

O risco total R pode ser obtido aproximadamente como sendo a soma dos riscos de cada efeito induzido pi ,

$$R = \sum_i pi = F \quad (5)$$

Onde, F é denominado, frequentemente, o *fator* ou *coeficiente de risco*, correspondente à probabilidade para um efeito fatal, por exemplo, um câncer, estimado em 10.000 pessoas por sievert.

O detrimento G à saúde de um indivíduo é obtido pela expressão

$$G = R.E = F.E \quad (6)$$

Onde, E = dose efetiva = dose equivalente de corpo inteiro $H_E = H_{WB}$.

3.8 RISCOS DE UMA BOMBA SUJA

Um dispositivo de dispersão radiológica (RDD) ou bomba suja é uma arma simples capaz de causar dano humano, contaminação ambiental, interrupção, “negação de área”, e custo econômico. Pode afetar pequenas, grandes ou longas áreas dependendo da estabilidade

atmosférica. O risco de desenvolver um câncer radioinduzido depende da exposição e uma resposta eficaz depende da orientação oportuna disponível (ANDRADE, 2016).

Além do câncer, outras injúrias podem acometer o indivíduo por meio da bomba suja, como: (a) trauma agudo da explosão; (b) danos em órgãos-alvos específicos, e (c) intoxicação por metais pesados, fibrose subsequente e cicatrizes.

3.9 O AMERÍCIO

Após uma exposição ao amerício, muitos fatores determinam se haverá ou não algum dano. Esses fatores incluem a dose (quanto), a duração (por quanto tempo) e a forma como se entra em contato com o radionuclídeo (UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2004).

O Amerício é um metal. Não existem isótopos naturais ou estáveis de amerício. Existem dois importantes isótopos: (a) Amerício-241 (^{241}Am) e (b) Amerício-243 (^{243}Am). Ambos os isótopos têm o mesmo comportamento químico no meio ambiente. ^{241}Am e ^{243}Am emitem partículas alfa e decaem para Neptúncio-237 (^{237}Np) e Neptúncio-239 (^{239}Np), respectivamente. O neptúncio também é radioativo, então os isótopos deste elemento também liberam radiação e se transformam em isótopos de outros elementos. Este processo continua e, eventualmente, termina quando isótopos estáveis de bismuto e chumbo são formados. A meia-vida do ^{241}Am é de 432 anos. O acúmulo deste radionuclídeo tem sido relatado na literatura como preferencial para o pulmão, fígado, ossos e medula óssea. O uso comercial predominante do ^{241}Am é em detectores de fumaça tipo ionização e em perfurações geológicas chamadas *well-logging*. Esta aplicação depende das partículas alfa que são produzidas quando o isótopo decai como uma fonte de ionização. Ele também é usado para aplicações de calibração industrial e em dispositivos de diagnóstico médico. No Brasil, há uma particularidade de haver muitas fontes órfãs de ^{241}Am em para-raios antigos. Os Estados Unidos e a Rússia pretendem transformar as ogivas nucleares em combustível de reator de energia, fazendo um combustível de óxido misto de urânio e plutônio. Este combustível, chamado MOX, conterá ^{241}Am e ^{243}Am , e o plano é usá-lo para produzir energia.

3.9.1 Meio Ambiente

^{241}Am e ^{243}Am podem ser liberados para o meio ambiente a partir de reatores nucleares, explosões nucleares e acidentes, RDD, bem como de produtos de fabricação que

contenham amerício (como detectores de fumaça). O decaimento radioativo é a única maneira de diminuir a quantidade de amerício no meio ambiente. Liberados para a atmosfera serão associados a partículas e se estabelecerão na terra ou serão lavados do ar na precipitação (por exemplo, chuva, neve). Podem permanecer na atmosfera por décadas antes de se instalarem no solo. Por exemplo, Am lançados em acidentes nucleares, como o acidente em Chernobyl, permanecerão na atmosfera inferior e começarão a se instalar no solo perto do local do qual foi lançado. As partículas maiores se estabelecerão mais rapidamente e em uma área menor; Partículas menores podem permanecer na atmosfera por vários meses e migrar para distante de onde foram liberados. A precipitação remove partículas do ar mais rapidamente. A partir do momento em que forem depositados no solo, não migrarão por longas distâncias, devido à ligação com outras partículas encontradas.

A quantidade absorvida de ^{241}Am nas plantas é pequena, especialmente nas partes da planta que são mais frequentemente consumidas (ou seja, frutas, grãos e sementes). Nos peixes a quantidade que se acumula na carne é muito pequena. A maioria dos Amerícios encontrados em animais marinhos como camarão ou mexilhão estão contidos na casca, em vez de nas partes comestíveis do animal (UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2004).

3.9.2 Fisiologia

O amerício pode entrar no corpo via ar respirado, alimentos e água ingeridos, ou pelo contato com a pele. Se respirar o ar que contém amerício, algumas formas de amerício que se dissolvem facilmente no fluido pulmonar permanecem nos pulmões por horas ou dias. Outras formas que não se dissolvem facilmente no fluido pulmonar, podem permanecer nos pulmões por meses ou anos. Algum amerício que entra nos pulmões pode entrar no sangue. Se houver a sua ingestão, uma quantidade muito pequena do que entra no trato digestivo também pode entrar no sangue. A maioria do amerício que entra no sangue deixa o corpo pela urina e fezes. Da pequena quantidade que permanece no corpo, a maioria corre para os ossos, onde pode permanecer por muitas décadas; uma quantidade menor vai para o fígado e outros órgãos, onde pode permanecer por alguns anos.

Uma maneira de ver se um produto químico prejudicará as pessoas é aprender como o produto químico é absorvido, usado e liberado pelo corpo. No caso de um produto químico radioativo, também é importante coletar informações sobre a dose e a taxa de dose de radiação.

No processo de decaimento radioativo, o amerício libera partículas alfa e raios gama. As partículas alfa são partículas de energia relativamente altas, mas viajam apenas distâncias extremamente curtas e não penetram na pele. No entanto, se o amerício é levado ao corpo e entra nos tecidos do corpo, as partículas alfa podem causar danos nas células próximas. Os raios gama podem percorrer distâncias muito maiores e podem penetrar todo o corpo. Uma vez que as partículas alfa não penetram na pele e os raios gama liberados das fontes do amerício são relativamente baixos em energia, a exposição externa ao amerício geralmente não é considerada um perigo para sua saúde. A radiação do amerício é a principal causa de efeitos adversos para a saúde do amerício absorvido. A exposição a níveis extremamente elevados de amerício, como foi relatado em alguns estudos em animais, resultou em danos aos órgãos, como os pulmões, fígado, rins e tireoide. No entanto, exceto em exposições intencionais como em um RDD, é raro que uma pessoa seja exposta a quantidades de amerício suficientemente grandes para causar efeitos nocivos nesses órgãos (UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2004).

3.9.3 Efeitos na Saúde

Para atender as necessidades das pessoas que foram expostas ao radionuclídeo, a informação é organizada por via de exposição (inalação, oral e dérmica) e por efeitos de saúde (morte, sistema, Efeitos imunológicos, neurológicos, reprodutivos, de desenvolvimento, genotóxicos e cancerígenos). Estes dados são discutidos em termos de três períodos de exposição: aguda (14 dias ou menos), intermediária (15 a 364 dias) e crônica (365 dias ou mais).

A informação disponível das exposições humanas indica que as partículas que contêm amerício no ar são depositadas no trato respiratório, limpas até certo ponto por ação mucociliar, e engolidas ou expelidas (EDVARDSSON & LINDGREN, 1976; FRY 1976; NEWTON et al., 1983; SANDERS 1974; TOOHEY & ESSLING, 1980). Os dados quantitativos para as frações de absorção de compostos de amerício resultando em absorção sistêmica rápida, média e lenta são resumidos pela ICRP, 1996. Nenhum relatório foi localizado em relação à morte em seres humanos, resultante da exposição por inalação aguda, intermediária ou de duração crônica ao amerício. A EPA (Environmental Protection Agency) considera que todos os radionuclídeos são carcinógenos humanos e calculou fatores de risco de câncer para inalação de Amerício.

3.9.4 Mecanismo de Ação

Os aerossóis em partículas inalados de amerício serão depositados no trato respiratório. As quantidades e os padrões de deposição de partículas no trato respiratório são afetados pelo tamanho das partículas inaladas, fatores relacionados à idade, via respiratória (por exemplo, respiração nasal versus respiração bucal), geometria da via aérea e velocidade do fluxo aéreo no trato respiratório (ICRP 1994B, JAMES ET AL., 1994; ROY et al., 1994). Em geral, partículas grandes ($> 2,5 \mu\text{m}$) se depositam preferencialmente na região nasofaríngea, onde as altas velocidades da circulação aérea e a geometria das vias aéreas facilitam a impactação inercial (CHAN & LIPPMAN 1980, JAMES et al., 1994). Nas regiões traqueobrônquicas e alveolares, onde as velocidades da corrente de ar são mais baixas, processos como sedimentação e interceptação tornam-se importantes para a deposição de partículas menores ($< 2,4 \mu\text{m}$). A velocidade do fluxo de ar e a geometria das vias aéreas mudam com a idade, dando origem a diferenças relacionadas com a idade na deposição de partículas (James 1978, JAMES et al., 1994; PHALEN et al., 1985). As características anatômicas, bem como seu uso (nariz versus respiração bucal), também afetam a rota de admissão (nariz ou boca). A deposição nas várias regiões do trato respiratório em crianças pode ser maior ou menor do que em adultos, dependendo do tamanho de partícula.

3.9.5 Mecanismos de Toxicidade

A toxicidade do amerício resulta principalmente do dano causado pela partícula alfa emitida durante a decomposição radioativa. Esta partícula alfa tem uma penetração muito limitada no tecido e, portanto, o dano celular (incluindo danos ao material genômico) ocorre apenas nas imediações do amerício sequestrado. As partículas alfa depositam toda sua energia em uma curta distância de viagem. A grande carga e massa da partícula alfa consideram a forte interação com as células circundantes. A energia transferida ioniza a matéria celular localizada em seu caminho diretamente e por hidrólise de água (aproximadamente 70%) em células humanas. A interação de radiação com a água produz moléculas de água ionizadas e excitadas referidas como produtos de radiólise. Essas espécies de água reativa têm uma metade do tempo suficientemente longa para que possam se difundir do local de interação e interagir com moléculas biológicas, o que pode aumentar o dano celular resultante. Assim, danos celulares podem resultar tanto diretamente da própria radiação como indiretamente das reações químicas envolvendo espécies reativas de produtos de radiólise.

3.9.6 Potencial para exposição humana

No banco de dados do órgão americano EPA consta que o amerício foi identificado em pelo menos 8 dos 1.636 locais de resíduos perigosos que foram propostos para inclusão na Lista de Prioridades Nacionais da EPA (NPL) (HAZDAT, 2004). No entanto, o número de sites avaliados para o amerício não é conhecido.

3.10 LIBERAÇÃO DO MATERIAL RADIOATIVO PARA A ATMOSFERA

A atmosfera é uma das principais vias pela qual o material de um Dispositivo de Dispersão Radiológica (RDD) pode se dispersar em grandes áreas e atingir diversos sítios ambientais. Os efeitos sobre os humanos e biosfera decorrentes de liberações atmosféricas de material radioativo devem ser avaliados levando-se em consideração dados meteorológicos e características específicas do cenário. Em um dispositivo RDD, o material pode ser lançado a grandes distâncias por conta da força da explosão e atingir camadas mais elevadas na atmosfera, onde o vento pode alterar sua velocidade e, dependendo da altura atingida na explosão, o material pode alcançar correntes de circulação local e global, facilitando a sua dispersão para locais bem distantes do local do evento inicial (YVES, 2014).

Geralmente as liberações atmosféricas ocorrem entre a superfície do solo e a “camada limite planetária” que varia de 200m a 2000m acima da superfície (ROCHEDO, 2005). Os materiais radioativos liberados para a atmosfera são transportados pelo vento e dispersos por processos naturais de difusão atmosférica turbulenta (ROCHEDO, 2005).

A camada limite próxima à superfície do solo é a mais relevante na liberação e dispersão atmosférica, possuindo grande variação de velocidade e de turbulência. O gradiente vertical de temperatura tem grande influência sobre o fenômeno de turbulência. Nos casos em que a temperatura diminui a uma taxa maior que $0,01^{\circ}\text{C}/\text{m}$, a atmosfera apresenta-se instável e os movimentos das camadas de ar verticais são mais intensos (ROCHEDO, 2005).

Para um estudo sobre liberações atmosféricas, é necessário se conhecer com precisão dados como: (a) velocidade dos ventos, (b) chuva, (c) insolação, (d) estimativa da população no momento da dispersão e (e) características físicas dos tipos de construções na região.

Um modelo matemático bastante adotado para estimar dispersão atmosférica é semi-empírico de pluma gaussiana. É considerado de análise e resolução rápida, embora ofereça limitações para um estudo mais realista. O modelo tem sido amplamente utilizado e validado pela comunidade científica e, ainda, é o mais utilizado para os cálculos iniciais de dispersão

atmosférica (YVES, 2014). Devido à sua facilidade de aplicação, é uma forte ferramenta para análise em curto intervalo de tempo, além de produzir resultados que são compatíveis com dados experimentais. O método é bastante conservativo e por isso oferece condições de agravamento do cenário, considerando as piores hipóteses, apresentando-se como uma forma de abordagem interessante em uma primeira aproximação, pois avalia as condições de maior rigor a serem enfrentadas.

3.11 FONTES RADIOATIVAS

Ações assimétricas (terrorismo) são difíceis de prever e podem gerar consequências devastadoras. Nenhum país pode se considerar livre de ações desta natureza. Há notada preocupação mundial na aquisição de material radioativo para esses fins. O Banco de Dados de Incidentes e Tráfico de fontes radioativas (*Incident and Trafficking Database, ITDB*) é disponibilizado e os dados fornecidos pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), que controla regularmente incidentes envolvendo material nuclear, reportando para os seus países membros.

Incidentes incluídos neste grupo envolvem a perda ou roubo de material nuclear ou fontes radioativas de instalações nucleares ou durante o transporte do material. Furtos e perdas podem marcar o início de um incidente e são indicativos de vulnerabilidades dos sistemas de segurança e controle na instalação de origem (IAEA, 2014). Essas informações coletadas são de interesse na implementação de medidas de segurança e regularização por parte dos governos de modo a impor melhores condições de uso, depósito, transporte e disposição dos materiais radioativos sob sua guarda ou tutela. A maior parte dos furtos e perdas relatados ao ITDB envolve fontes radioativas que são usadas em aplicações médicas ou industriais. Dispositivos contendo fontes radioativas podem ser atrativos pelo alto valor de revenda no mercado negro ou como sucata de metal (IAEA, 2013).

A AIEA identificou fontes radioativas usadas em radiografia industrial, radioterapia, radiadores industriais e geradores termo elétricos como os mais significativos com relação à segurança física e radiológica, pois eles contêm grandes quantidades de material radioativo (IAEA, 2009). FERGUSON e colaboradores (FERGUSON, 2003) listaram as fontes radioativas comerciais mais significativas, cuja compilação de resultados é apresentada na tabela 3.1.

TAB.3.1: Fontes radioativas comerciais mais significativas

Isótopo	Comumente Utilizado	Forma	Meia-Vida (anos)	Emissão Primária
Cs-137	Teleterapia, instalações de esterilização	Sólido e pó	30,1	β e γ
Co-60	Teleterapia, radiografia industrial e instalações de esterilização	Sólido e metal	5,3	β e γ
Ir-192	Radiografia industrial e braquiterapia	Sólido e metal	0,2	β e γ
Ra-226	Braquiterapia de baixas doses	Sólido e metal	1600	α e γ
Sr-90	Geradores Termoelétricos	Sólido e pó	28,8	β
Am-241	Indústrias de extração de madeira, well-logging	Sólido e pó	432	α
Pu-238	Fontes de energia para marca-passos e fontes de pesquisa	Sólido e pó	88	α

Fonte: FERGUSON, 2003

3.12 CÂNCER

Câncer é o nome atribuído ao conjunto de mais de cem doenças que têm em comum o crescimento desordenado e fora de controle de clones mutantes de algumas células que, proliferando em prejuízo das células vizinhas sadias dos tecidos e órgãos, levam à completa destruição da colônia celular e à formação de uma massa compacta de células anormais continuamente em crescimento chamada tumor ou neoplasia (ALBERTS et al., 2004).

Existem dois tipos de câncer: (a) benigno e (b) maligno. Os tumores benignos são simplesmente uma massa localizada de células cancerígenas, que se proliferam lentamente,

mas se assemelham ao tecido original. Embora nesta forma de câncer o tumor possa crescer provocando danos nos órgãos vizinhos, raramente constituem um risco de morte. Nos tumores malignos, as células cancerígenas se proliferam rapidamente e normalmente são muito agressivas e incontroláveis, podendo se espalhar e invadir outras regiões do corpo por meio da circulação sanguínea e dos vasos linfáticos. Esse processo de migração para outras partes do corpo, na formação do câncer maligno, desenvolve suas próprias angiogênese, o que favorece a ocorrência da metástase (COUNCIL CANCER NEW SOUTH WALES, 2015).

4. METODOLOGIA

Por meio da plataforma hotspot, foi simulada a explosão de um RDD envolvendo a liberação do Amerício-241. Os dados de entrada no Hotspot podem ser verificados na tabela 4.1.

TAB 4.1: Dados de entrada no software Hotspot

Material e Taxa de Absorção	Am-241 W (moderada) 432.2 (anos)
Material em risco (MAR) – é a quantidade total do radionuclídeo envolvido na liberação	7.4000E+11 Bq
Dose Total Efetiva Equivalente – TEDE	Dose Total Efetiva Equivalente = inalação + submersão + deposição no solo + ressuspensão.
Índice de Danos (DR) fração do MAR que é realmente impactado no cenário.	1,000 (100%)
Fração Liberada (ARF) fração do MAR que é liberada para a atmosfera.	1,000 (100%)
Fração Respirável (RF) fração de material aerossol que é respirável (diâmetro aerodinâmico (AD) \leq 10 microns).	0,200 (20%)
Fator de Filtração (LPF) é a fração do MAR, que passa por algum mecanismo de confinamento ou de filtração. Para cenários de liberação livre, o Fator <i>Leakpath</i> é 1.	1,000
Material Respirável = $MAR \times DR \times LPF \times ARF \times RF$	1.48E+11 Bq
Material Não-Respirável = $MAR \times DR \times LPF \times ARF \times (1-RF)$	5.92E+11 Bq
Velocidade do Vento (h=10 m)	1.00 m/s

Material Explosivo	10.00 Libras de TNT (25kg)
Tipo de Terreno	Padrão – Produz as estimativas mais conservativas
Altura Máxima de Detritos	66 m

No momento da explosão, há dispersão de material radioativo, havendo contaminação e exposição ao meio ambiente e ao público no local, e em áreas bem distantes. A inalação deste radioisótopo pode trazer inúmeros danos respiratórios, inclusive o câncer de pulmão.

Foram delimitadas as zonas de estudo de acordo com os grupos de isodoses recebidas por cada indivíduo (até 100 mSv, 50 mSv e 1 mSv), bem como pela distância/dose recebida da fonte de explosão. Foi considerada a distância máxima de 50 km de análise, considerando ser um nível de distância segura com dose no nível de *background* natural local.

Após o programa fornecer as doses totais equivalentes efetivas (TEDE), que correspondem todas as doses de todas as vias que o indivíduo foi exposto, bem como a dose equivalente comprometida em cada órgão (neste caso, no pulmão). Ambos na distância de 30 m a 50 km de distância do RDD como é apresentado na tabela 5.1, e após a obtenção desses dados, foram utilizadas as equações do BEIR V para a estimativa de ERR e PC para incidência de câncer de pulmão.

De acordo com as isodoses recebidas e a densidade demográfica do local, é possível calcular a dose coletiva. E em seguida fornecer o custo estimado de detrimento deste cenário, ressaltando ser o custo estimado, uma vez que há inúmeros fatores que interferem neste valor: como por exemplo, fatores de predisposição ao câncer de pulmão, injúrias e traumas provocados pela explosão, qual medida de proteção para o público será decidida, dentre outros.

Por último, os dados apresentados irão assessorar ao processo decisório para a emergência, provendo informações relevantes sobre o cenário para que ocorra o atendimento imediato ou tardio a fim de mitigar danos decorrentes da inalação do Am-241. A figura 4.1 resume a metodologia utilizada neste trabalho.

ASPECTO GERAL DA METODOLOGIA DO TRABALHO

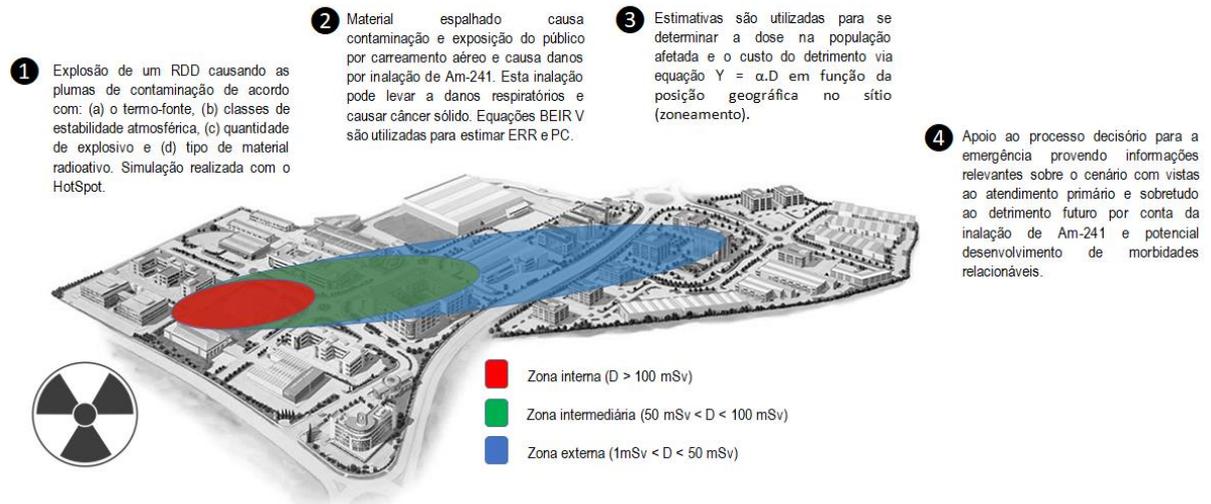


Fig. 4.1- Metodologia de Convergência aplicada ao cenário RDD.

As velocidades e direções foram inseridas no software, tendo como dados de saída a distribuição das doses, em sievert (Sv), de acordo com a distância em quilômetros e a área da pluma de dispersão atmosférica, a qual permite estudar a população afetada, uma vez que na configuração do cenário são distribuídos vinte receptores, a 1,5m de altura e distâncias entre 30m e 50 Km.

As condições de contorno de isodoses foram escolhidas com base na RESOLUÇÃO CNEN Nº 027, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2004, onde são descritas as diretrizes básicas de proteção radiológica, por meio da NORMA CNEN-NN-3.01, sendo verificados os seguintes aspectos:

- 100 mSv Limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas.
- 50 mSv Nível de ação para evacuação de população em situações de emergência.
- 1 mSv Limite anual para público em situação em operação normal.

Esses grupos delimitados de controle operacional podem ser observados na tabela 4.2.

As áreas de controle operacional permitem conhecer a população submetida às doses predefinidas nas condições de contorno multiplicando-se o valor das áreas delimitadas pela densidade demográfica média da população do município tomando-se por base o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, onde se

verifica a menor densidade de 9.794 habitantes/km² (zona sul) e a maior 10.185 habitantes/km² (zona norte).

Os dados de saída do código foram tabelados comparativamente, de maneira que sua análise incluísse a influência da direção dos ventos prevalentes da região, sendo feitas simulações com dispersões nas direções norte, sul, leste e oeste.

As condições meteorológicas determinam as classes de estabilidade (classes de Pasquill-Guilford), que podem também ser predefinidas pelo HotSpot. Como o objetivo do trabalho é o estudo de um cenário orientado à resposta à emergência, consideraram-se situações críticas e factíveis, escolhendo-se as condições meteorológicas possíveis e capazes de apresentar maiores danos à população quando aplicadas ao cenário. A tabela 4.2 apresenta áreas de controle operacional utilizadas neste trabalho.

TAB. 4.2: Áreas de Controle Operacional

ÁREAS DE CONTROLE	DOSE (mSv)
INTERNA	100
MÉDIA	50
EXTERNA	1

4.1 CÓDIGO COMPUTACIONAL HOTSPOT

O código *HotSpot Health Physics 3.0.3*, desenvolvido pelo laboratório americano *Lawrence Livermore National Laboratory – LLNL*, é de acesso livre e de uso recorrente pela Agência Internacional de Energia Atômica. Foi concebido para prover uma ferramenta metodológica computacional rápida e portátil para avaliar incidentes envolvendo material radioativo. É gratuito, não havendo licença para sua utilização. O código HotSpot apresenta um modelo conservativo para estimar a dose e a concentração de radionuclídeos como resultado da liberação de materiais radioativos na atmosfera. Este software, por sua rapidez de cálculo e modelagem conservativa, também é utilizado para a análise de segurança de instalações de manuseio de material nuclear.

O código utiliza um modelo gaussiano para calcular a dispersão do material radioativo à medida que este se desloca com os ventos na área impactada dependendo principalmente das condições climáticas. O modelo requer uma menor computação intensiva de dados e vem

sendo utilizado por conta da interpretação simples que fornece que é adequada a uma primeira aproximação da descrição do evento. O HotSpot considera os seguintes parâmetros:

- (a) modelo de dispersão atmosférica;
- (b) condições meteorológicas (velocidade do vento, classe de estabilidade e altura da camada de inversão);
- (c) detalhes da pluma radioativa (material radioativo): quantidade e natureza da pluma, velocidade de deposição, altitude de explosão (*Height to Burst: HOB*);
- (d) energia da explosão,
- (e) tempo (tempo de amostragem e tempo de exposição).

O código usa as metodologias de dosimetria de radiações recomendadas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) em seu banco de dados. O modelo numérico gaussiano ainda é o carro-chefe de base para cálculos de dispersão atmosférica e tem sido bem utilizado pela maioria das normas do governo. O modelo também tem sido usado e é homologado pelo governo americano e pela sua Agência de Proteção Ambiental (EPA).

A adequação deste modelo para fazer estimativas de dispersão e segurança nos piores cenários foi testada e verificada por muitos anos. O código Hotspot segue estritamente o modelo Gaussiano bem estabelecido. Todos os algoritmos são apresentados e totalmente referenciados no banco de dados do programa.

O código HotSpot 3.0.3 calcula a TEDE para inalação, submersão, ressuspensão e exposição a material radioativo suspenso na atmosfera, utilizando os valores dos coeficientes de dose a partir dos documentos *Federal Guidance Report* (FGR) 11, 12 e 13, onde: o FGR-11 (1988) fornece os coeficientes de dose integrada para inalação aguda de radionuclídeos e baseia-se nos modelos dosimétricos da ICRP-30 (1981); o FGR-12 (1993) fornece coeficientes de dose para a exposição externa a radionuclídeos em ar, água ou solo e o FGR-13 (1999) fornece coeficientes de dose usando a ICRP-66 (1994) e metodologias da ICRP 60/70 (1991) (HOMMAN, 2013). Como arquivos de saída, o HotSpot 3.0.3 fornece resultados na forma de tabelas e plumas de isodoses.

Após a liberação para a atmosfera, os radionuclídeos sofrem transporte de vento (advecção) e processos de mistura (difusão turbulenta). O material radioativo também será removido da atmosfera por deposição úmida e seca no solo e por decaimento radioativo.

4.1.1 Modelo Gaussiano

O modelo Gaussiano é aplicado aqui para avaliar a dispersão das liberações atmosféricas a longo prazo; Este modelo é amplamente aceito para uso em atividades de avaliação radiológica. O modelo é considerado apropriado para representar a dispersão de liberações intermitentes contínuas ou de longo prazo a uma distância de alguns quilômetros da fonte (IAEA, 2001).

O modelo gaussiano determina a concentração do dispersante em determinado ponto do espaço. A direção de transporte é dada pela direção do vento que prevalece no ponto de liberação e assume-se que as condições atmosféricas, uma vez determinadas, são constantes ao longo da modelagem. Os fenômenos de dispersão meteorológica e atmosférica que influenciam os padrões de contaminação são tratados de forma resumida neste texto.

As equações do modelo Gaussiano estimam a concentração de um gás ou um aerossol em qualquer ponto do espaço seguindo a equação:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (7)$$

onde, C = concentração atmosférica integrada no tempo (Ci-s)/(m³); Q = atividade da fonte (Ci); H = altura efetiva de liberação (m); λ = constante de decaimento radioativo (s⁻¹); x = distância na direção do vento (m); y = distância na direção perpendicular ao vento (m); z = distância no eixo vertical (m); σ_y = desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção perpendicular ao vento (m); σ_z = desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical (m); u = média da velocidade do vento na altura efetiva de liberação (m/s); L = altura da camada de inversão (m); e $DF(x)$ = fator de depleção da pluma.

Se a camada de inversão (L) excede σ_z , a equação a ser utilizada, com os mesmos parâmetros apresentados para a equação 7 torna-se:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y L u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (8)$$

A transição das duas equações acima é iniciada quando σ_z é 70% de L e finalizada quando são iguais. No intervalo desta transição os valores são interpolados linearmente para dar um valor mais realista, evitando variações abruptas em pequenos intervalos (HOMANN, 2013).

4.1.2 Deposição Seca

A velocidade efetiva de deposição é calculada pela razão do fluxo de deposição $\frac{\mu Ci}{cm^2.s}$ e a concentração no ar próximo a superfície $\frac{\mu Ci}{cm^3}$. Gases, vapores e pequenos particulados são depositados na superfície e podem permanecer no solo durante muito tempo. Por este motivo, a concentração na pluma resultante será menor devido a depleção de parte do material.

Para a maioria dos materiais, a velocidade de deposição é em torno de 1 cm/s (HANNA, 2002). No software são utilizadas duas metodologias de velocidade de deposição, uma para velocidade de partículas respiráveis com diâmetro aerodinâmicos menores que 10 microns e outra para partículas não respiráveis com diâmetro maior que 10 microns. O default no software para essas velocidades é: (a) respirável = 0,3 cm/s e (b) não respirável = 8,0 cm/s (HOMANN, 2013).

A quantidade de material sofre depleção com o aumento da distância e o software HotSpot usa o fator modelado por *Van der Hoven* (1968).

$$DF(x) = \left[\exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_x(x) \exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z(x)}\right)^2\right]} \right]^{-\frac{v}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (9)$$

Onde, $DF(x)$ é o Fator de depleção, (adimensional), x é distância na direção do vento (m), v é a velocidade de deposição (cm/s), u = velocidade média do vento (m/s), H = altura de liberação, $\sigma_z(x)$ é desvio-padrão da concentração da distribuição na direção vertical (eixo z).

4.1.3 Ressuspensão

O efeito de ressuspensão é considerado no software, determinado na altura de 2 metros do solo (em uma velocidade média de 2m/s). Caso a velocidade do vento seja acima de 3 m/s, tal fator é ajustado segundo a equação 7 (HOMANN, 2013):

$$RF(u) = RF \cdot \left(\frac{u}{3}\right)^2 \quad (10)$$

Onde RF é o fator de ajuste e u é a velocidade do vento. A definição do fator de ressuspensão é a razão da concentração do material no ar em função da concentração no solo, apresentando, portanto, dimensão m^{-1} .

4.1.4 Classificação de Estabilidade Atmosférica

Conforme YVES e colaboradores (2014), o código permite ao usuário a classificação do deslocamento das camadas de ar no sentido vertical em: (a) estáveis, (b) instáveis e (c) neutras. Essas categorias referem-se a como a parcela de ar reage quando é dispersa de forma adiabática na direção vertical.

O desvio-padrão na direção do vento horizontal está relacionado com as Categorias de Estabilidade Atmosférica de Pasquill, admitido como um sistema de classificação recomendado pela (*Nuclear Regulatory Commission NCR*) e definido como segue (notação Pasquill-Gifford):

- (a) A Muito Instável ($\sigma_\theta = 25^\circ$)
- (b) B Moderadamente Instável ($\sigma_\theta = 20^\circ$)
- (c) C Pouco Instável ($\sigma_\theta = 15^\circ$)
- (d) D Neutro ($\sigma_\theta = 10^\circ$)
- (e) E Moderadamente Estável ($\sigma_\theta = 5^\circ$) e
- (f) F Muito Estável ($\sigma_\theta = 2.5^\circ$).

A Tabela 4.3 contém os critérios utilizados para estimar as seis classes de estabilidade.

TAB. 4.3: Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F

Velocidade do vento (m/s)	Alta insolação no céu	Baixa insolação no céu ou nublado	Noturno
< 2	A	B	F

2 – 3	A	C	E
3 – 4	B	C	D
4 – 6	C	D	D
> 6	C	D	D

Fonte: (HOMANN, 2013).

O Hotspot também possui uma opção de classe de estabilidade “G” utilizada para condições de velocidade de vento baixo. Esta opção utiliza uma flutuação mais típica e maior na direção do vento (desvio padrão de 25 graus, o que produz uma diluição mais rápida da pluma e menores concentrações de ar).

Além da velocidade dos ventos outros fatores influenciam nas diferenças entre as classes de estabilidade como o perfil de temperatura vertical, altura da camada de mistura e nível de insolação.

4.1.5 Profundidade da Camada de Mistura

A parte da troposfera que sofre influências diretamente da superfície do solo é denominada camada limite atmosférica sendo caracterizada pelas trocas verticais:

- a) De calor
- b) De vapor de água; e.
- c) Momento entre o solo e a atmosfera.

Esta troca depende da rugosidade do solo, da hora do dia, estação do ano e da cobertura de nuvens. A camada convectiva ou de mistura é uma subcamada de extrema importância dentro da camada limite, sendo caracterizada por uma grande movimentação vertical das parcelas de ar.

A profundidade da camada de mistura pode se estender de algumas dezenas de metros à noite a alguns quilômetros durante um dia quente de verão e com poucas nuvens. Na tabela 4.4, os valores típicos da profundidade da camada de mistura para diferentes classes de estabilidade são apresentados.

TAB. 4.4: Valores típicos de profundidade da camada de mistura para diferentes classes de estabilidades

Categoria de Estabilidade	Profundidade da Camada de Mistura (m)
A	1600
B	1200
C	800
D	560
E	320
F	200

Fonte: HOMANN, 2013

4.1.6 Perfil de Temperatura Vertical

Dependendo do equilíbrio entre os diferentes processos de troca térmica, a estrutura vertical da camada limite atmosférica apresenta um gradiente positivo ou negativo de temperatura, que determina fortemente o movimento turbulento na atmosfera. A figura 4.2 mostra os perfis de temperatura vertical em diferentes condições atmosféricas.

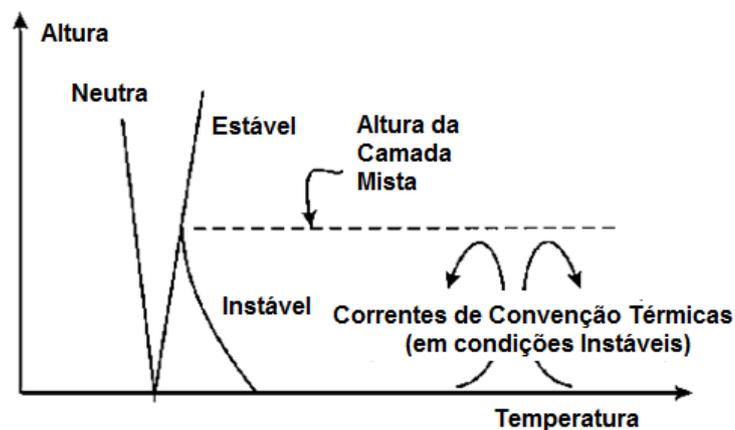


FIG. 4.2: Perfis de temperatura vertical em diferentes condições atmosféricas. Fonte: adaptado de RADIATION PROTECTION DIVISION, 2002.

Em situações meteorológicas de sol quente sem nuvens, com fracas velocidades dos ventos, a radiação solar aquece o solo, e como consequência, o ar perto do nível do solo. O ar quente tende a ir para regiões de menor temperatura, e consequentemente, o ar frio tende a descer, este processo é denominado corrente de convecção. Um movimento turbulento prevalece dentro da camada de mistura que apresenta como resultado o gradiente de temperatura fortemente negativo (tipicamente $< 1^\circ / 100 \text{ m}$), e o estado da atmosfera é denominado "instável" (RADIATION PROTECTION DIVISION, 2002).

Situações com gradientes de temperatura indistintas de cerca de $1^\circ/100\text{m}$ normalmente ocorrem em situações de maior velocidade dos ventos e durante a cobertura de nuvens altas e são geralmente chamados de condições "neutras".

4.1.7 Tempo de Amostragem

As equações para o desvio-padrão da distribuição gaussiana são representativas de uma observação em um período de 10 min. No hotspot esse tempo médio é definido como tempo de amostragem da simulação, não podendo ser alterado. O valor de desvio-padrão é matematicamente relacionado com o padrão de 10 min por meio da seguinte equação (VAN 1968, HANNA 1982, GIFFORD, 1975):

$$\sigma_{y'} = \sigma_y \left[\frac{t}{10} \right]^{0,2} \quad (11)$$

onde $\sigma_{y'}$ é o desvio-padrão da concentração com tempo de amostragem de t em minutos e σ_y é o desvio no tempo de 10 min.

A concentração do material disperso na direção do vento diminui com o aumento do tempo de amostragem devido ao maior desvio-padrão na direção calculada e da maior dispersão na direção do vento.

4.2 BEIR V (*BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION: HEALTH EFFECTS OF EXPOSURE TO LOW LEVELS OF IONIZING RADIATION*)

O câncer é uma das maiores causas de morbidade e mortalidade do mundo (IAEA, 1996). É bem conhecido e difundido que o câncer possui várias causas e diferentes tipos de

carcinogêneses que são atualmente estudados. Entre alguns dos muitos fatores que podem induzir o câncer estão radiação ionizante e ultravioleta, cigarro, consumo de álcool, bem como agentes químicos, entre outros (BEIR V, 1990).

O comitê da academia nacional de ciência conduziu um grande estudo sobre os dados de indução de câncer por meio de exposições à radiação ionizante e desenvolveu alguns modelos de risco relativo com variáveis de dose, sexo, idade e tempo desde a exposição para o cálculo do excesso de mortalidade. Estes modelos assumem um caráter multiplicativo na medida em que transportam do Japão para os Estados Unidos da América os modelos de risco e coeficientes derivados de ajustes estatísticos de sobreviventes da bomba atômica, o *Life Span Study* (LSS), um estudo epidemiológico desenvolvido sobre sobreviventes dos bombardeios nucleares sobre o Japão no fim da 2ª Guerra Mundial. Em geral, o comitê BEIR considera resultados padronizados para a população americana, mas que para estudos como este que enfatizam a metodologia, pode ser aproximado.

As funções matemáticas envolvidas possuem incertezas associadas elevadas. Isso ocorre porque não há como se determinar elementos fundamentais para um estudo epidemiológico, dentre outros, como: (a) étnicos e biológicos dos sobreviventes, (b) tipo de alimentação que mantinham e (c) históricos médicos e familiares.

Para doses absorvidas agudas de 0,1 Gy ou maiores, o BEIR V deriva um modelo para a estimativa de cânceres sólidos. Este documento possibilita a obtenção do excesso de risco relativo (ERR) e probabilidade de causalidade (PC) de detrimento para radiações de baixa Transferência Linear de Energia (LET, do inglês Linear Energy Transfer). O que determina o modelo a ser utilizado é a morbidade a ser estudada.

4.2.1 Excesso de Risco Relativo (*Excess Relative Risk* – ERR)

O ERR é a taxa de doença em uma população exposta dividida pela taxa de doença em uma população não exposta, uma razão para quantificar a associação entre exposição e doença, ou seja, indica o percentual de ocorrência acima da linha de base para a população exposta à radiação. Sua unidade é dada através de ERR/Sv.

4.2.2 Probabilidade de Causalidade (PC)

A probabilidade de causalidade refere-se à fração do risco que um indivíduo apresenta de desenvolver determinada morbidade em decorrência da exposição à radiação ionizante, ou

seja, o percentual de causa devido à exposição sofrida. (LEE W-C, 2015). Na prática, o valor PC mede a correlação estatística entre o aparecimento de uma morbidade e a exposição à radiação ionizante anterior (BEIR V, 1990).

Não é simples correlacionar o desenvolvimento de câncer e a exposição à radiação como fenômenos de causa e efeito. Em estudos radioepidemiológicos a exposição à radiação é o fator de maior interesse e epidemiologistas procuram relacionar o risco de doenças (principalmente câncer) a diferentes níveis e padrões de exposição. Embora inconclusivos, os estudos epidemiológicos têm sido de especial importância na avaliação do potencial risco para a saúde humana associada à exposição à radiação ionizante. Desta forma, o conceito de probabilidade de causalidade (PC) foi adotado e desenvolvido como a fração do risco para ocorrência da morbidade.

Com isso, foram calculados os excessos de risco relativos (ERR) e as probabilidades de causa (PC) para toda a população afetada e para ambos os sexos, na distância de 30 m a 50 Km.

Para o Excesso de Risco Relativo foi considerada a seguinte formulação matemática (IAEA, 1996):

$$ERR_M = r_0(a,s) [1 + \alpha_1 D_{exp} (\beta_1 \log_e(T/20))], \text{ masculino} \quad (12)$$

$$ERR_F = r_0(a,s) [1 + \alpha_1 D_{exp} (\beta_1 \log_e(T/20) + \beta_2)], \text{ feminino} \quad (13)$$

onde, a= idade atingida; s= sexo; t= tempo de exposição; $\alpha_1 = 0,636 \text{ Sv}^{-1}$; $B_1 = -1,437$; $B_2 = 0,711$; D= dose. A unidade é ERR/Sv.

O cálculo da Probabilidade de Causa (PC) é obtido por:

$$PC = \left(\frac{ERR-1}{ERR} \right) \times 100 \quad (14)$$

Os resultados para ERR e PC podem ser vistos nas figuras 5.3 e 5.4 respectivamente.

4.3 CUSTO DE DETRIMENTO

É o custo do prejuízo obtido por cada dose recebida em cada indivíduo ou o dano total à saúde experimentado por um grupo exposto e seus descendentes, como resultado da

exposição a uma fonte de radiação. É um conceito multidimensional. Seus principais componentes são as variáveis estocásticas (probabilidade de câncer fatal ou não, efeitos hereditários e morte) (ICRP 55, 1989), obtido por meio da relação matemática:

$$Y = \alpha S \quad (15)$$

onde, Y é o custo de detrimento, S é a dose coletiva, α é o coeficiente monetário por US\$/indivíduo.sievert.

A melhor solução de otimização é a que se obtém o menor custo de detrimento total. O valor adotado pela ICRP na maioria dos países segue o padrão: (a) Países desenvolvidos: US\$20.000,00; (b) Japão: US\$ 25.000,00 e (c) Brasil: US\$ 10.000,00.

A ICRP 22 (1973) havia sugerido que seria útil expressar a avaliação da dose coletiva em unidades monetárias, de modo que a vantagem na redução da dose coletiva pudesse ser comparada com o detrimento ou custo para acompanhar esta redução.

4.4 INTERVENÇÕES EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

Em situações onde ocorre liberação de material radioativo, decisões rápidas são necessárias. Medidas de proteção urgentes incluem (CNEN, 2011):

- (a) abrigagem,
- (b) evacuação,
- (c) Reassentamento Temporário ou Relocação e
- (d) Reassentamento Definitivo.

A Posição Regulatória CNEN 3.01/006:2011 referente à norma 3.01 que trata das diretrizes básicas de proteção radiológica, estabelece medidas de proteção e critérios de intervenção e ação em situações de emergências radiológicas e nucleares. Estas medidas são direcionadas de acordo com a exposição radiológica encontrada. Abrange ações de proteção e posteriormente de remediação.

Devido à diferença entre os efeitos determinísticos e estocásticos, dois tipos de doses são necessários ao se discutir às ações de proteção: (a) dose projetada e (b) dose evitada. A dose projetada é utilizada para expressar o risco de efeitos determinísticos e a dose evitada

para efeitos estocásticos. A definição de dose projetada é compreendida como a dose prevista que um indivíduo receberia em um determinado período de tempo T_d , se nenhuma ação protetora fosse implementada, considerando as previsões de evolução do incidente, a probabilidade de liberações de materiais radioativos para o meio ambiente e as condições de dispersão existentes (CNEN, 2011).

As ações de intervenção ou proteção têm o objetivo de orientar as medidas de proteção necessárias para evitar ou reduzir a exposição da população à radiação, estas ações devem seguir níveis expressos de limitação em termos da dose que pode ser evitada num período de tempo Δt , correspondente à duração de uma ação protetora, ou seja, é a dose à qual os indivíduos estariam sujeitos na ausência da medida de proteção, integrada no período Δt , diminuindo-se a dose integrada à qual estariam sujeitos com a aplicação da medida de proteção (IAEA, 1994).

TAB. 4.5: Ação de Proteção e limites

Medida de Proteção	Dose evitada pela ação de proteção
Abrigagem	10 mSv
Evacuação	50 mSv
Reassentamento Temporário ou Relocação	30 mSv
Reassentamento Definitivo	1 mSv

Fonte: adaptados da norma CNEN 3.01/006:2011

As ações de proteção de abrigagem e evacuação, devem ser implementadas com urgência de forma a proteger o público da pluma de contaminação e complementadas por ações de controle de acesso, proteção respiratória dos respondedores e descontaminação do público se for o caso. A abrigagem tem o objetivo de reduzir a exposição à contaminação suspensa no ar e ao material radioativo depositado em superfícies. A população deve permanecer no interior de prédios, vedar portas e janelas e desligar o sistema de ventilação. Esta medida deve ser adotada quando uma evacuação rápida não for possível devido a condições ambientais adversas, restrições por saúde, dificuldades para locomoção de pessoal ou restrições físicas de outra natureza. A definição de evacuação pode ser descrita como a retirada urgente de pessoas de seus locais, para fora do campo de radiação ou do possível caminho da nuvem radioativa.

E o termo reassentamento se aplica à remoção de indivíduos de áreas contaminadas por radionuclídeos para outros locais, com a interdição dessas áreas, de modo a evitar exposições crônicas à radiação. O reassentamento temporário visa uma remoção organizada e deliberada de pessoas, de uma área afetada por um acidente, por um período longo (alguns meses), porém limitado. Quando o período de reassentamento previsto for superior a dois anos, deve ser considerado o reassentamento definitivo da população. Entende-se por reassentamento definitivo a remoção deliberada de pessoas de uma área, sem expectativa de retorno.

O critério de escolha da fonte sendo o Amerício-241 tem amparo no TECDOC-1344 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003), que trata da categorização de fontes radioativas e apresenta as fontes e seus usos, atividades e riscos atribuídos.

Foi utilizado como parâmetro a ICRP-30 (Comissão Internacional de Proteção Radiológica), fornecendo o limite para incorporação de radiação de trabalhadores.

Toda opção foi sempre estimando o pior cenário, inclusive o default do software é extremamente conservativo.

5. RESULTADOS

Após a simulação do hotspot, extraímos do programa alguns dados relevantes para o estudo, como a Dose Total Equivalente Efetiva e a dose equivalente comprometida no pulmão. Ambos na distância de 30 m a 50 km de distância do RDD como é apresentado na tabela 5.1.

TAB. 5.1: Doses de radiação de acordo com a distância do RDD

Distância (km)	TEDE (Sv)	Dose Equivalente Comprometida no Pulmão (Sv)
0.03	9.60E+00	1.50E+00
0.1	3.80E+00	5.80E-01
0.274	1.50E+00	2.30E-01
0.4	6.20E-01	9.60E-02
0.5	4.60E-01	7.00E-02
0.6	3.80E-01	5.80E-02
0.7	3.30E-01	5.10E-02
0.8	3.00E-01	4.60E-02
0.9	2.70E-01	4.10E-02
1.0	2.50E-01	3.80E-02
1.4	1.00E-01	1.60E-02
1.5	9.20E-02	1.40E-02
2	6.20E-02	9.50E-03
2.4	5.00E-02	7.70E-03
2.5	4.80E-02	7.30E-03
10	8.60E-03	1.30E-03
20	3.70E-03	5.60E-04
47	1.00E-03	1.60E-04
50	9.40E-04	1.40E-04

Fonte: HOMMAN, 2013

O software também fornece alguns gráficos de acordo com o cenário criado e as informações necessárias ao estudo. Podemos observar na figura 5.1 a deposição no solo do

radionuclídeo, em função da distância, e na figura 5.2 a relação da TEDE com o as características do vento.

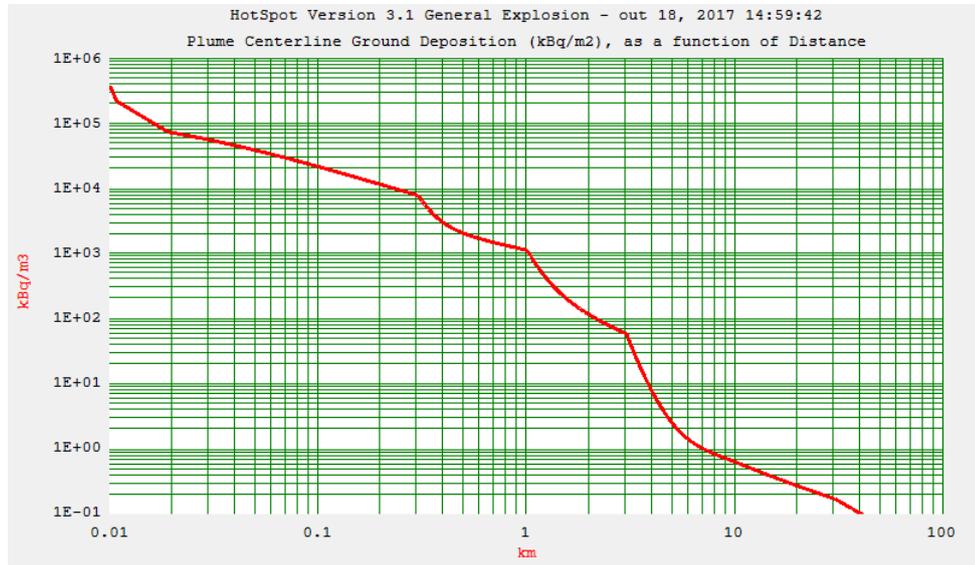


FIG.5.1: Deposição da radiação no solo x distância

Fonte: HOMMAN, 2013

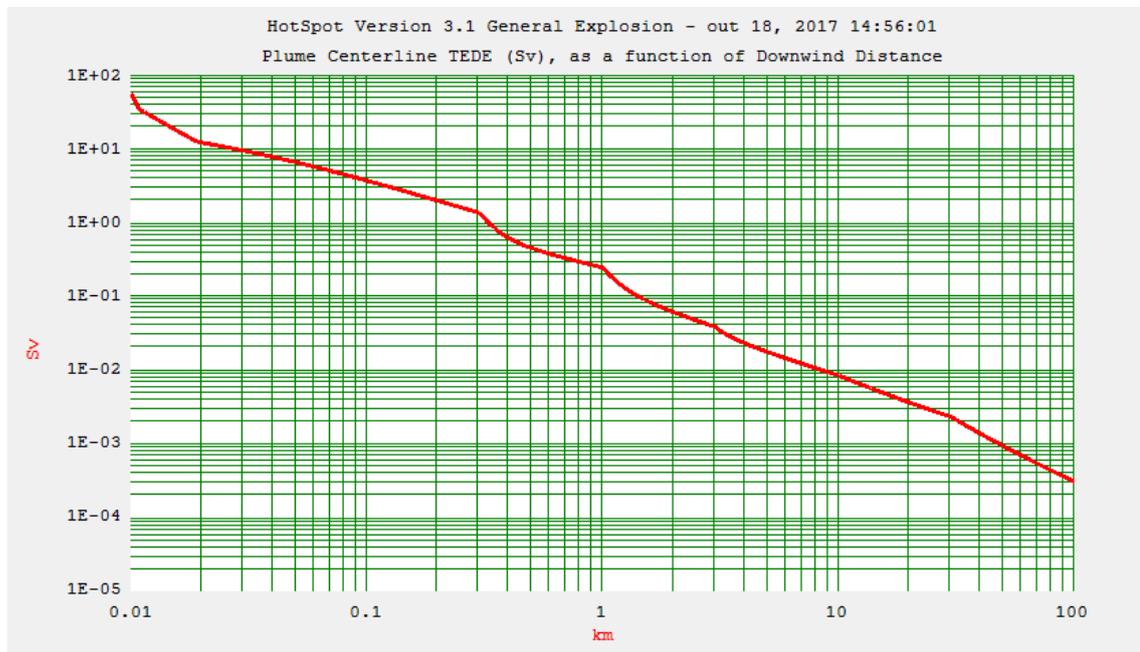


FIG.5.2: TEDE em função do Vento

Fonte: HOMMAN, 2013

Com os dados de doses obtidos pelo Hotspot, foi calculado o Excesso de Risco Relativo de incidência de câncer de pulmão e a probabilidade de Causa, que são apresentados nas figuras 5.3 e 5.4 respectivamente.

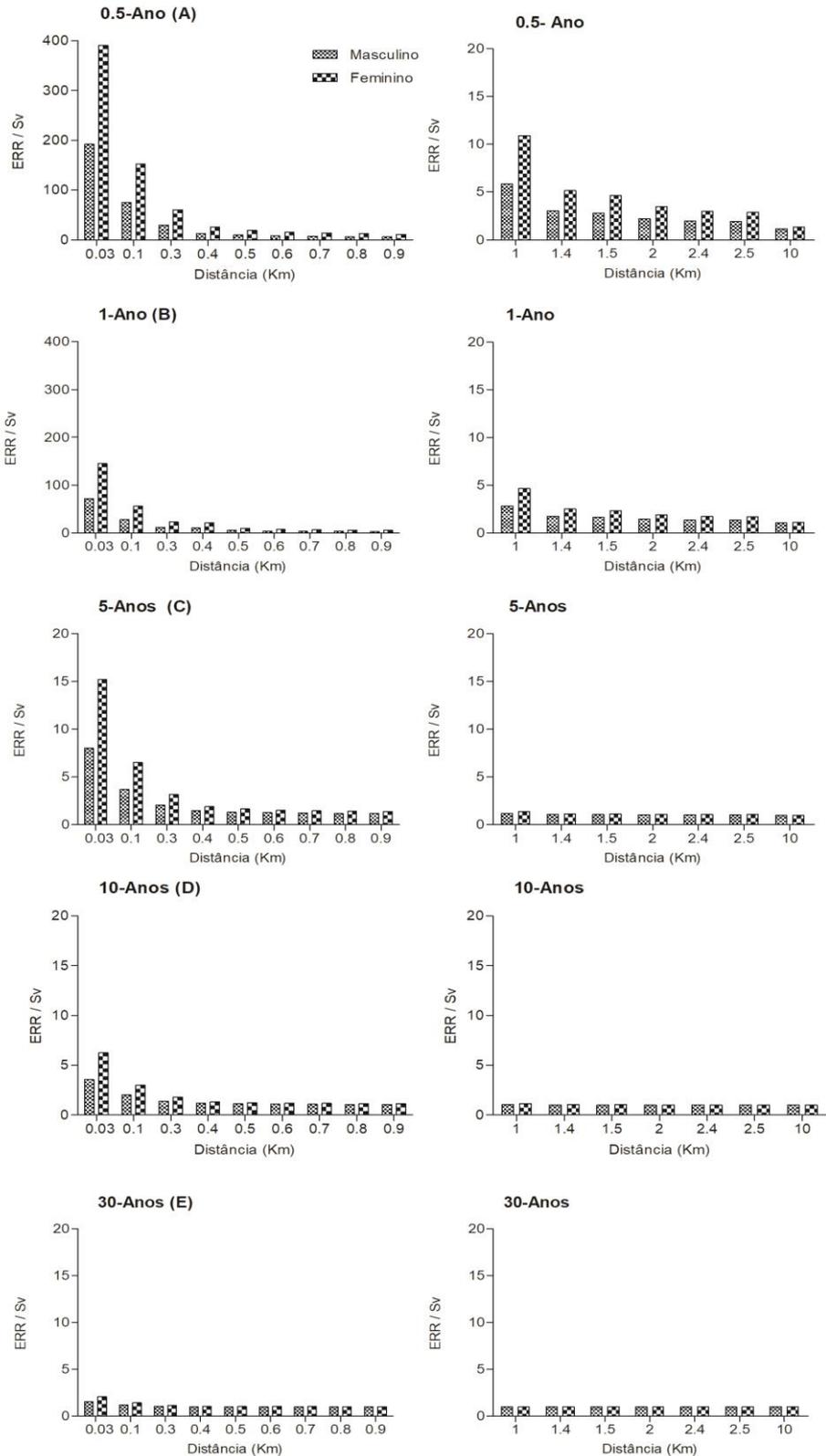


FIG. 5.3 – ERR: (A) em 6 meses após a exposição, (B) 1 ano, (C) 5 anos, (D) 10 anos e (E) 30 anos.

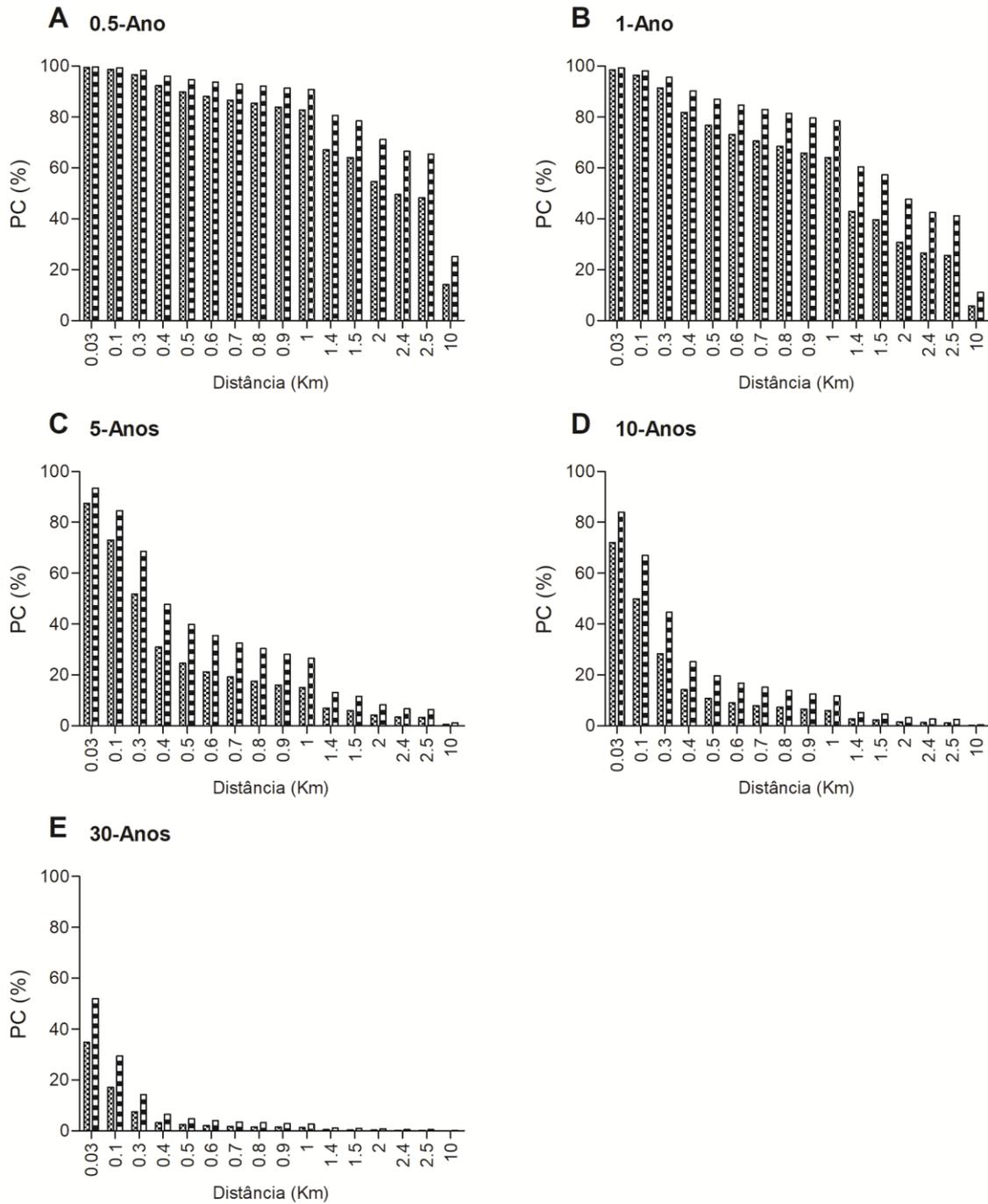


FIG. 5.4: PC: (A) em 6 meses após a exposição, (B) 1 ano, (C) 5 anos, (D) 10 anos e (E) 30 anos.

Foi possível extrair dos resultados gerados pelo código três linhas de contorno para as áreas de controle operacional chamadas de interna, média e externa, sendo, a cada uma atribuído um limite de dose, conforme demonstram a figura 5.5.

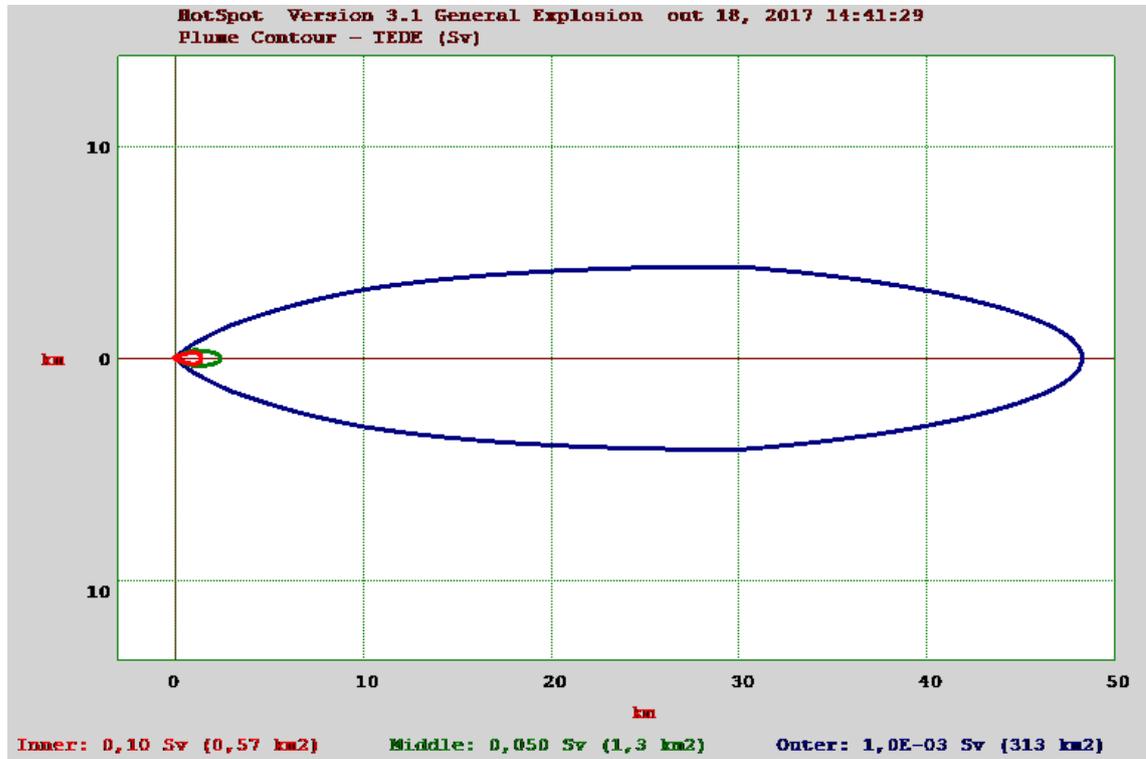


FIG. 5.5: Pluma de delimitação das isodoses

AGRUPAMENTO DE ISODOSES

A tabela 5.2 sintetiza bem o estudo apresentado e fornece dados importantes para um processo decisório.

TAB. 5.2: Agrupamento de isodoses

ISODOSE	NÚMERO DE HABITANTES	DOSE COLETIVA (Pessoa.Sievert)	DETRIMENTO (US\$)	MEDIDA DE PROTEÇÃO
58 Sv (10m)	Acima da LD ₅₀ (4Sv)			
9.6 Sv (30m da explosão)				
3.8 Sv (100m)	Distância não segura quanto à explosão. Haverá risco da radiação, trauma e injúrias.			
(0.274 Km) Limite mínimo para danos térmicos e mecânicos até 1.4 km (100mSv)	5.485	3.08E+03	30.768.830,40	EVACUAÇÃO (50 < D < 100 mSv)
Abaixo de 100 mSv até 50 mSv (2,4 km)	14.691	9.99E+02	9.989.880,00	
Abaixo de 50 mSv até 1 mSv (47 km)	3.036.140	4.65E+04	465.288.455,00	ABRIGAGEM (1 < D < 50 mSv)
0.9 mSv (50 km)	Distância segura com dose no nível <i>background</i>			

O número de habitantes foi obtido considerando a densidade demográfica no centro e zona sul do município do Rio de Janeiro de 9,794 habitantes/Km², conforme o Censo de 2010.

6. DISCUSSÃO

Um cenário RDD oferece inúmeras oportunidades de análise e as variáveis que podem ser levadas em consideração dependem do que se deseja observar. Os dados gerados pela aplicação do software HotSpot incluídos na modelagem de consequências com base nas equações do BEIR V podem ser recursos importantes para se determinar ações que sejam de apoio ao processo de decisão na resposta tanto imediata quanto avançada ao cenário.

O software inicialmente fornece a dose total equivalente efetiva que o indivíduo foi exposto, ou seja, o somatório de todas as vias que o indivíduo recebeu de radiação (inalação, submersão, deposição no solo e ressuspensão do material da pluma) e para o cálculo de Excesso de Risco Relativo, gerou-se as doses Equivalentes Comprometidas no Pulmão, aja vista ser um parâmetro o qual obtêm-se a dose incorporada pelo órgão alvo, restringindo o objeto de estudo e análise: câncer de pulmão.

Foram estimadas as doses totais equivalentes efetivas (TEDE) e as doses equivalentes comprometidas no pulmão no espaço compreendido entre 10 metros a 50 km da pluma gerada da dispersão do RDD (dispositivo de dispersão radiológica). Inicialmente, foi calculado o valor da dose equivalente comprometida no pulmão, que permitiu ser calculado o Excesso de Risco Relativo (ERR) para incidência de câncer de pulmão após “n” anos. Foi calculado o ERR no intervalo de tempo de 6 meses até 30 anos após a exposição, considerando apenas amostragem de indivíduos adultos para que facilite uma análise, se houver interesse, apenas de indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE).

A figura 5.3 mostra diferenças relacionadas à incidência do câncer de pulmão até uma distância de 10 Km. Os dados apresentados sugerem que as taxas de risco de câncer são dependentes da idade e baseado no estudo bioestatístico BEIR V, tendem a aumentar com o avançar dos anos. Porém para câncer de pulmão, parece haver uma redução significativa no valor de ERR após 25 anos ou mais da exposição. O sexo feminino apresenta uma disparidade quando comparado ao sexo masculino no tocante ao ERR e PC. Observa-se um maior diferencial de relação Dose/Sexo/distância para tempos mais curtos após a exposição.

O ERR para o sexo feminino na distância de 30 m do RDD dobra em relação ao sexo masculino até a distância de 1 Km, depois, essa proporção vai se equiparando. Após um ano de exposição, a incidência começa a diminuir, porém a proporção 2:1 de ERR do sexo feminino (2) em relação ao sexo masculino (1) a partir de 8 km se igualam, e com o avançar

dos anos, essa distância que iguala o valor de ERR entre os sexos, vai diminuindo e após transcorrido 30 anos não há mais esta relação de 2:1 entre ERR dos sexos masculino e feminino.

A probabilidade de causa para distâncias menores que 100 m são quase equivalentes para ambos os sexos, conforme apresenta a figura 5.4. A partir de 0,2 km começa a observar uma PC maior para o sexo feminino, e quase dobra a partir de 6 Km. A PC para o sexo masculino vai diminuindo mais rápido que a PC do sexo feminino. Em seis meses, a PC para o sexo masculino é > 90% até a distância de 400m, depois vai decrescendo rapidamente. Já no sexo feminino, permanece > de 90 % até a distância próxima a 1 Km. Após um ano observa-se que os valores de PC começam elevados e equiparados entre os sexos em distâncias mais próximas da fonte e vão diminuindo com o afastamento da fonte, porém no sexo feminino, a PC vai diminuindo sempre mais lentamente que no sexo masculino. E em 30 anos a PC é reduzida, quase zero para ambos os sexos, próximo de 2 Km.

Mediante os resultados dissertados alusivos às figuras 5.3 e 5.4 recomenda-se que delimite o público o quanto antes: seja IOE, sexo feminino, sexo masculino, ou de acordo com as isodoses as quais direcionarão a intervenção. Quanto mais rápido for delimitado o público a ser estudado, mais precisa será a análise de risco de câncer por radioindução, pois ficam restritos outros fatores que contribuem para a incidência de câncer, como por exemplo, hábitos alimentares e tabagismo.

Por meio da tabela de agrupamento de doses gerada após os valores de ERR (tabela 5.2), pode-se observar que os valores iniciais de detrimento estão diretamente relacionados à dose coletiva sofrida no momento da explosão. É delimitada a intervenção de proteção de acordo com os grupos pré-estabelecidos como isodoses, otimizando tempo e custo em ações de emergência realmente necessárias.

Analisando a tabela 5.2, pode se observar que na distância do HotSpot (local da explosão) até o afastamento de aproximadamente 100 m, não foi estimado o custo de detrimento, em virtude do software fornecer alguns parâmetros de segurança que auxiliam no zoneamento do cenário e delineamento da ação emergencial.

Até 30 m de distância, os valores de doses recebidas pelos indivíduos estão acima da dose letal média ou LD_{50/30} (do inglês, *Lethal dose*), a qual significa em toxicologia ser a dose necessária de uma substância ou radiação para matar 50% da população em trinta dias. No

caso da radiação, considera-se 3,5 a 5,3 Gy (aproximadamente 4 Sv para fótons de corpo inteiro) (IAEA, 1996).

Já a partir de 30 m até 100 m, a simulação mostra ser uma região de maior risco, havendo além do risco radiológico, outros danos associados para estimar, devido aos traumas e lesões decorrentes da explosão.

A partir da distância a qual o Hostpot considera segura, uma vez que não há consequências mecânicas da explosão propriamente dita, que é a partir de 274 m até 50 km, é possível estimar de forma mais assertiva o número de habitantes/sobreviventes, calcular a dose recebida coletiva, o custo de detrimento da resposta à emergência radiológica e direcionar, inclusive, algumas medidas de proteção e intervenção.

Analisando ainda o custo de detrimento, nota-se que apesar de o número de habitantes correspondente a isodose de 100 mSv (0,274 a 1,4 km) ser menor que o número de habitantes relacionado a isodose que se enquadra no grupo de abaixo de 100 a 50 mSv (1,5 a 2,4 km), o custo do detrimento é maior para o grupo que foi exposta a 100 mSv. Isso está diretamente relacionado à dose de exposição. Uma vez que se é exposto a uma dose maior, maior risco de desenvolver outros riscos estocásticos e determinísticos, bem como um risco maior de contaminação associada à exposição.

No intervalo de exposição de taxa de dose compreendido entre 50 mSv e 1 mSv , o valor do custo de detrimento novamente aumenta, por englobar uma área de extensão e número de habitantes muito maior.

A partir de 1 mSv, encontrado na área acima de 47 km de distância da dispersão, dispensa medidas de proteção e custo de detrimento, uma vez que se enquadrará em uma distância segura referente à dose e à explosão, considerada *background*. O custo de detrimento pode ser verificado na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Custo de detrimento do cenário

DISTÂNCIA	NÚMERO DE HABITANTES	DOSE COLETIVA (Pessoa.Sievert)	CUSTO DE DETRIMENTO (US\$)
0 a 100 m	Há variáveis que impedem a estimativa do custo de detrimento		
274 m a 1.4 km (100mSv)	5.485	3.08E+0	30.768.830,40
1.5 km a 2.4 Abaixo de 100 mSv até 50 mSv	14.691	9.99E+02	9.989.880,00
2.5 km a 47 km Abaixo de 50 mSv até 1 mSv	3.036.140	4.65E+04	465.288.455,00

Fica subjetivo, porém, estimar o custo de detrimento ao longo de 30 anos, uma vez que inúmeros fatores de hábitos são associados, sendo importante, portanto, uma decisão eficaz o quanto antes.

7. CONCLUSÃO

O cenário de liberação de material radioativo para o meio ambiente pode levar à exposição da população e a sérios comprometimentos com seus desdobramentos. Ações e medidas corretas tem um bom impacto na questão econômica, temporal e qualidade de atendimento. A metodologia proposta pode assessorar de forma eficaz no processo decisório no momento da emergência, gerando informações valiosas para: (a) filtrar o número de pessoas e diferenciar o tipo de medida de proteção e atendimento de maneira otimizados; (b) estimar as doses Total Equivalente Efetiva (TEDE) e as Comprometidas (neste caso no pulmão), gerando uma matriz de incidência de câncer de pulmão para um período de 30 anos; (c) mitigar custos de detrimento da operação.

Uma vez simulado o cenário de determinada emergência e seu desdobramento, é possível ter uma visão ampla, presumindo parte dos acontecimentos, custos e riscos, evitando problemas que poderiam ser previstos com tais estudos preliminares. Haja vista, em uma emergência desta conjectura poderá haver inúmeros outros problemas subjetivos associados em situação de caos para o processo decisório, como por exemplo, o sistema de comunicação para o público, trânsito, e rede hospitalar para atendimento. Uma emergência com RDD engloba inúmeras intervenções que vão além da expertise de análise do risco radiológico. Tendo o setor de emergência radiológica bastante controlado, facilita a atuação e decisão sobre os demais setores.

O câncer de pulmão foi utilizado como morbidade de referência. Porém, o documento Tecdoc-870 da Agência Internacional de Energia Atômica fornece outras equações para outros tipos de cânceres que podem ser utilizadas para previsão do risco.

Estudos associando capacidades de forma integradas representam um desafio e um instrumento bastante atual, porém é um método ainda pouco explorado e descrito em artigos científicos.

Com essa metodologia de convergência obtém-se uma valiosa ferramenta que apoia o processo de gerenciamento da emergência.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS

Há a perspectiva de, futuramente, adicionar a esta metodologia novas ferramentas de assessoramento e controle, como os softwares RESRAD-RDD e ERICA, também utilizados pela Agência Internacional de Energia Atômica, com base na Agência de Proteção Ambiental Americana, a fim de analisar o comprometimento e risco ambientais de um incidente radiológico.

Essas são ideias que podem orientar futuros trabalhos envolvendo a modelagem de consequências, podendo ser úteis para o desenvolvimento de metodologias mais complexas sobre o enfrentamento desta classe de problemas.

9. REFERÊNCIAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Public Health Statement: Americium**. Atlanta, Abril, 2004.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Toxicological Profile for Americium**. Atlanta, Abril, 2004.

Araújo, O.O. **Metodologia de análise de risco ocupacional e modelagem de Consequência em um cenário RDD: mapeamento de risco de câncer sólido**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: informação e documentação – referências – elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.

Brum, Tercio. **Metodologia de Modelagem de Risco Radiológico por Avaliação in situ Utilizando Monitoramento Aéreo com Asa Rotativa**. Tese (Doutorado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

CNEN. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica – 3.01**. Rio de Janeiro, 2014.

CNEN. **Medidas de proteção e critérios de intervenção em situações de emergência– 3.01_06**. Rio de Janeiro, 2011.

De Lira, R.F. **Otimização de sistemas de radioproteção para serviços de medicina nuclear**. Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-Graduação Em Tecnologias Energéticas E Nucleares – PROTEN, UFPE, 2012.

Ferguson C D, K. T., and Perera J (2003). **Commercial Radioactive Sources: Surveying the Security Risks**. Monterey Institute of International Studies, Center for Nonproliferation Studies. Occasional Paper no. 11.

Florig, H. K. and B. Fischhoff (2007). **"Individuals' decisions affecting radiation exposure after a nuclear explosion."** Health Phys92(5): 475-483.

Homann, S. G. **Hotspot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide**. CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2013.

IAEA. **TECDOC-870: Methods for estimating the probability of cancer from occupational radiation exposure**. Vienna, 1996.

IAEA. **Safety Reports Series n. 19 – Generic Models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment**. Vienna, 2001.

IAEA. **TECDOC-1300: follow-up of delayed health consequences of acute accidental radiation exposure**. VIENNA, 2002.

IAEA. **TECDOC-1344: Categorization of radioactive sources**. Vienna, 2003.

IAEA, **Categorization of Radioactive Sources, Safety Standards Series No. RS-G-1.9**. Vienna, 2005.

ICRP. **Publication 119: Compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60**. Vienna, October, 2011.

ICRP. **Optimization and Decision Making in Radiological Protection**. ICRP Publication 55, 1990.

ICRP. **Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable**. ICRP Publication 22.1973.

Lee, W.C. **Excess Relative Risk as an effect measure in case-control studies of rare diseases**. Plos One journal, 2015

NATIONAL ACADEMY PRESSY. **Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V**. Washington, D.C, 1996.

NATIONAL ACADEMY PRESSY. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. **Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII, phase 2.** Washington, D.C, 2006.

Rochedo, E. R. R., Amaral, E. C. S., Godoy, J. M. O., Wasserman, M. A. V. (2005). **Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental.** Rio de Janeiro, Brasil, Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

RS-G-1.9, I. S. S. S. N. (2005). Categorization of Radioactive Sources. Vienna, Austria.

Rosoff, H., & von Winterfeldt, D. (2007). **A risk and economic analysis of dirty bomb attacks on the ports of Los Angeles and Long Beach.***Risk Anal*, 27(3), 533-546. doi:10.1111/j.1539-6924.2007.00908.x

Rother, F.C. et al. **Radiological Risk Assessment by Convergence Methodology Model in RDD Scenarios.** Risk Analysis, 2015.

Tauhata, L., Salati, I. P. A., Di Prinzio, R., Di Prinzio, a. R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear. 9ª revisão. 345 p. Rio de Janeiro: Novembro de 2013.

U.S. Environmental Protection Agency Office of Radiation and Indoor Air. **Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population.** Washington, D.C, Dezembro, 2008.

U.S. Environmental Protection Agency. **Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure Radionuclides: Federal Guidancen Report No.13.** Washington, D.C, 1999.

Valverde, N., Leite, T., Maurmo, A.**manual de ações Médicas em emergências Radiológicas.** Eletrobrás, 2010.

Yves, T. L. A. et.al. **Terrorist Radiological Dispersive Device (RDD): Scenario and Cancer Risk Assessment.** Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2012.

Yves, T. L. A. **Potenciais impactos ambientais e riscos para a saúde humana decorrentes de explosão de um dispositivo de dispersão radiológica (RDD).** Dissertação (Mestrado) – IRD/CENEN, Rio de Janeiro, 2014.

http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Causes_of_death_statistics/pt

<http://censo2010.ibge.gov.br/>

ANEXO 1

DADOS FORNECIDOS PELO SOFTWARE HOTSPOT

HotSpot Version 3.1 General Explosion
out 18, 2017 14:35:01

Source Material : Am-241 W 432.2y
Material-at-Risk (MAR) : 7,4000E+11 Bq
Damage Ratio (DR) : 1,00
Airborne Fraction (ARF) : 1,000
Respirable Fraction (RF) : 0,200
Leakpath Factor (LPF) : 1,000
Respirable Source Term : 1,48E+11 Bq
Non-respirable Source Term : 5,92E+11 Bq
Wind Speed (h=10 m) : 1,00 m/s
High Explosive : 10,00 Pounds of TNT
Debris Cloud Top : 66 m
Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 47 m - 60 m (156 ft - 198 ft)
Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 9,4 m - 15 m (31 ft - 49 ft)
Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 6,5 m - 9,9 m (21 ft - 32 ft)
Onset of lethality (25 psi) : 4,2 m - 6,5 m (14 ft - 21 ft)
Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 2,3 m - 3,9 m (7,4 ft - 13 ft)
Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
corresponds to reflected overpressure generated using
Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : G
Sigma Theta : 25,0 deg
Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
Receptor Height : 1,5 m
Inversion Layer Height : None
Sample Time : 10,000 min
Breathing Rate : 3,33E-04 m3/sec
Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
 Maximum TEDE : 58 Sv
 Inner Contour Dose : 0,100 Sv
 Middle Contour Dose : 0,050 Sv
 Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
 Exceeds Inner Dose Out To : 1,4 km
 Exceeds Middle Dose Out To : 2,4 km
 Exceeds Outer Dose Out To : 48 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

Include Plume Passage Inhalation and Submersion
 Include Resuspension (Resuspension Factor : Constant Value) 1,00E-05 1/meter
 Exposure Window:(Start: 0,00 days; Duration: 4,00 days) [100% stay time].
 Initial Deposition and Dose Rate shown
 Ground Roughness Correction Factor: 1,000

DISTANCE	T E D E	RESPIRABLE TIME-INTEGRATED AIR CONCENTRATION	GROUND SURFACE DEPOSITION	GROUND SHINE DOSE RATE	ARRIVAL TIME
km	(Sv)	(Bq-sec)/m3	(kBq/m2)	(Sv/hr)	(hour:min)
0,030	9,6E+00	4,5E+07	5,6E+04	5,6E-06	<00:01
0,100	3,8E+00	1,9E+07	2,2E+04	2,2E-06	<00:01
0,274	1,5E+00	7,6E+06	8,6E+03	8,6E-07	00:01
0,300	1,4E+00	7,0E+06	7,9E+03	7,9E-07	00:02
0,400	6,2E-01	5,3E+06	3,0E+03	2,9E-07	00:02
0,500	4,6E-01	4,3E+06	2,1E+03	2,0E-07	00:03
0,600	3,8E-01	3,6E+06	1,7E+03	1,7E-07	00:04
0,700	3,3E-01	3,1E+06	1,5E+03	1,5E-07	00:04
0,800	3,0E-01	2,8E+06	1,3E+03	1,3E-07	00:05
0,900	2,7E-01	2,5E+06	1,2E+03	1,2E-07	00:05
1,000	2,5E-01	2,3E+06	1,1E+03	1,1E-07	00:06
1,400	1,0E-01	1,6E+06	2,8E+02	2,7E-08	00:09
1,500	9,2E-02	1,5E+06	2,2E+02	2,2E-08	00:09
2,000	6,2E-02	1,1E+06	1,2E+02	1,1E-08	00:13
2,400	5,0E-02	9,6E+05	8,4E+01	8,3E-09	00:15
2,500	4,8E-02	9,2E+05	7,9E+01	7,8E-09	00:16
10,000	8,6E-03	2,1E+05	6,5E-01	6,4E-11	01:06
20,000	3,7E-03	9,1E+04	2,7E-01	2,7E-11	02:13
47,000	1,0E-03	2,6E+04	7,8E-02	7,7E-12	05:12
50,000	9,4E-04	2,3E+04	7,0E-02	6,9E-12	05:32

DISTANCE	T E D E	RESPIRABLE TIME-INTEGRATED AIR CONCENTRATION	GROUND SURFACE DEPOSITION	GROUND SHINE DOSE RATE	ARRIVAL TIME
km	(Sv)	(Bq-sec)/m ³	(kBq/m ²)	(Sv/hr)	(hour:min)

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.030 km

Skin.....[1.5E-04]	Lung.....[1.5E+00]	thyroid.....[1.3E-04]
Surface Bone.[1.7E+02]	Red Marrow...[1.4E+01]	Liver.....[3.1E+01]
Spleen.....[1.6E-04]	Ovaries.....[2.6E+00]	Adrenals....[4.4E-04]
Breast.....[2.1E-04]	Stomach Wall.[2.6E-04]	SI Wall.....[3.4E-04]
ULI Wall.....[1.0E-03]	LLI Wall.....[2.5E-03]	Bladder Wall.[1.1E-04]
Thymus.....[1.4E-04]	Esophagus....[1.4E-04]	Muscle.....[2.1E-04]
Kidneys.....[3.5E-04]	Testes.....[2.6E+00]	Uterus.....[1.2E-04]
Pancreas.....[3.8E-04]	Brain.....[2.2E-04]	

Inhalation : 1.81E+00 (Plume Passage)
Submersion : 1.53E-07 (Plume Passage)
Resuspension: 7.80E+00

0.100 3.8E+00 1.9E+07 2.2E+04 2.2E-06 <00:01

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.100 km

Skin.....[5.7E-05]	Lung.....[5.8E-01]	thyroid.....[5.0E-05]
Surface Bone.[6.8E+01]	Red Marrow...[5.5E+00]	Liver.....[1.2E+01]
Spleen.....[6.4E-05]	Ovaries.....[1.0E+00]	Adrenals....[1.7E-04]
Breast.....[8.4E-05]	Stomach Wall.[1.0E-04]	SI Wall.....[1.3E-04]
ULI Wall.....[4.0E-04]	LLI Wall.....[9.9E-04]	Bladder Wall.[4.2E-05]
Thymus.....[5.4E-05]	Esophagus....[5.4E-05]	Muscle.....[8.4E-05]
Kidneys.....[1.4E-04]	Testes.....[1.0E+00]	Uterus.....[4.6E-05]
Pancreas.....[1.5E-04]	Brain.....[8.5E-05]	

Inhalation : 7.40E-01 (Plume Passage)
Submersion : 6.00E-08 (Plume Passage)
Resuspension: 3.02E+00

0.274 1.5E+00 7.6E+06 8.6E+03 8.6E-07 00:01

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.274 km

Skin.....[2.3E-05]	Lung.....[2.3E-01]	thyroid.....[2.0E-05]
Surface Bone.[2.7E+01]	Red Marrow...[2.2E+00]	Liver.....[4.9E+00]
Spleen.....[2.5E-05]	Ovaries.....[4.1E-01]	Adrenals....[6.8E-05]
Breast.....[3.3E-05]	Stomach Wall.[4.1E-05]	SI Wall.....[5.2E-05]
ULI Wall.....[1.6E-04]	LLI Wall.....[3.9E-04]	Bladder Wall.[1.7E-05]
Thymus.....[2.1E-05]	Esophagus....[2.1E-05]	Muscle.....[3.3E-05]
Kidneys.....[5.5E-05]	Testes.....[4.1E-01]	Uterus.....[1.8E-05]
Pancreas.....[5.9E-05]	Brain.....[3.4E-05]	

Inhalation : 3.02E-01 (Plume Passage)
Submersion : 2.39E-08 (Plume Passage)
Resuspension: 1.19E+00

0.300 1.4E+00 7.0E+06 7.9E+03 7.9E-07 00:02

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.300 km

Skin.....[2.1E-05]	Lung.....[2.1E-01]	thyroid.....[1.8E-05]
Surface Bone.[2.5E+01]	Red Marrow...[2.0E+00]	Liver.....[4.5E+00]
Spleen.....[2.3E-05]	Ovaries.....[3.7E-01]	Adrenals.....[6.3E-05]
Breast.....[3.1E-05]	Stomach Wall.[3.7E-05]	SI Wall.....[4.8E-05]
ULI Wall.....[1.5E-04]	LLI Wall.....[3.6E-04]	Bladder Wall.[1.5E-05]
Thymus.....[2.0E-05]	Esophagus....[2.0E-05]	Muscle.....[3.1E-05]
Kidneys.....[5.0E-05]	Testes.....[3.7E-01]	Uterus.....[1.7E-05]
Pancreas.....[5.4E-05]	Brain.....[3.1E-05]	

Inhalation : 2.78E-01 (Plume Passage)
Submersion : 2.20E-08 (Plume Passage)
Resuspension: 1.10E+00

0.400 6.2E-01 5.3E+06 3.0E+03 2.9E-07 00:02

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.400 km

Skin.....[9.5E-06]	Lung.....[9.6E-02]	thyroid.....[8.3E-06]
Surface Bone.[1.1E+01]	Red Marrow...[9.0E-01]	Liver.....[2.0E+00]
Spleen.....[1.1E-05]	Ovaries.....[1.7E-01]	Adrenals.....[2.8E-05]
Breast.....[1.4E-05]	Stomach Wall.[1.7E-05]	SI Wall.....[2.2E-05]
ULI Wall.....[6.6E-05]	LLI Wall.....[1.6E-04]	Bladder Wall.[7.0E-06]
Thymus.....[8.9E-06]	Esophagus....[8.9E-06]	Muscle.....[1.4E-05]
Kidneys.....[2.3E-05]	Testes.....[1.7E-01]	Uterus.....[7.6E-06]
Pancreas.....[2.4E-05]	Brain.....[1.4E-05]	

Inhalation : 2.12E-01 (Plume Passage)
Submersion : 1.04E-08 (Plume Passage)
Resuspension: 4.11E-01

0.500 4.6E-01 4.3E+06 2.1E+03 2.0E-07 00:03

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.500 km

Skin.....[7.0E-06]	Lung.....[7.0E-02]	thyroid.....[6.1E-06]
Surface Bone.[8.3E+00]	Red Marrow...[6.6E-01]	Liver.....[1.5E+00]
Spleen.....[7.7E-06]	Ovaries.....[1.2E-01]	Adrenals.....[2.1E-05]
Breast.....[1.0E-05]	Stomach Wall.[1.2E-05]	SI Wall.....[1.6E-05]
ULI Wall.....[4.9E-05]	LLI Wall.....[1.2E-04]	Bladder Wall.[5.1E-06]
Thymus.....[6.5E-06]	Esophagus....[6.5E-06]	Muscle.....[1.0E-05]
Kidneys.....[1.7E-05]	Testes.....[1.2E-01]	Uterus.....[5.6E-06]
Pancreas.....[1.8E-05]	Brain.....[1.0E-05]	

Inhalation : 1.72E-01 (Plume Passage)
Submersion : 7.73E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 2.84E-01

0.600 3.8E-01 3.6E+06 1.7E+03 1.7E-07 00:04

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.600 km

Skin.....[5.8E-06]	Lung.....[5.8E-02]	thyroid.....[5.1E-06]
Surface Bone.[6.9E+00]	Red Marrow...[5.5E-01]	Liver.....[1.2E+00]
Spleen.....[6.4E-06]	Ovaries.....[1.0E-01]	Adrenals.....[1.7E-05]
Breast.....[8.5E-06]	Stomach Wall.[1.0E-05]	SI Wall.....[1.3E-05]
ULI Wall.....[4.1E-05]	LLI Wall.....[1.0E-04]	Bladder Wall.[4.3E-06]
Thymus.....[5.4E-06]	Esophagus....[5.4E-06]	Muscle.....[8.5E-06]
Kidneys.....[1.4E-05]	Testes.....[1.0E-01]	Uterus.....[4.7E-06]
Pancreas.....[1.5E-05]	Brain.....[8.6E-06]	

Inhalation : 1.45E-01 (Plume Passage)
Submersion : 6.45E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 2.35E-01

0.700 3.3E-01 3.1E+06 1.5E+03 1.5E-07 00:04

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.700 km

Skin.....[5.1E-06]	Lung.....[5.1E-02]	thyroid.....[4.4E-06]
Surface Bone.[6.0E+00]	Red Marrow...[4.8E-01]	Liver.....[1.1E+00]
Spleen.....[5.6E-06]	Ovaries.....[9.0E-02]	Adrenals.....[1.5E-05]
Breast.....[7.4E-06]	Stomach Wall.[9.0E-06]	SI Wall.....[1.2E-05]
ULI Wall.....[3.5E-05]	LLI Wall.....[8.7E-05]	Bladder Wall.[3.7E-06]
Thymus.....[4.7E-06]	Esophagus....[4.7E-06]	Muscle.....[7.4E-06]
Kidneys.....[1.2E-05]	Testes.....[9.0E-02]	Uterus.....[4.1E-06]
Pancreas.....[1.3E-05]	Brain.....[7.5E-06]	

Inhalation : 1.26E-01 (Plume Passage)
Submersion : 5.63E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 2.06E-01

0.800 3.0E-01 2.8E+06 1.3E+03 1.3E-07 00:05

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.800 km

Skin.....[4.5E-06]	Lung.....[4.6E-02]	thyroid.....[4.0E-06]
Surface Bone.[5.4E+00]	Red Marrow...[4.3E-01]	Liver.....[9.7E-01]
Spleen.....[5.0E-06]	Ovaries.....[8.1E-02]	Adrenals.....[1.4E-05]
Breast.....[6.6E-06]	Stomach Wall.[8.1E-06]	SI Wall.....[1.0E-05]
ULI Wall.....[3.2E-05]	LLI Wall.....[7.8E-05]	Bladder Wall.[3.3E-06]
Thymus.....[4.2E-06]	Esophagus....[4.2E-06]	Muscle.....[6.6E-06]
Kidneys.....[1.1E-05]	Testes.....[8.1E-02]	Uterus.....[3.6E-06]
Pancreas.....[1.2E-05]	Brain.....[6.7E-06]	

Inhalation : 1.11E-01 (Plume Passage)
Submersion : 5.03E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 1.86E-01

0.900 2.7E-01 2.5E+06 1.2E+03 1.2E-07 00:05

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 0.900 km

Skin.....[4.1E-06]	Lung.....[4.1E-02]	thyroid.....[3.6E-06]
Surface Bone.[4.9E+00]	Red Marrow...[3.9E-01]	Liver.....[8.8E-01]
Spleen.....[4.6E-06]	Ovaries.....[7.3E-02]	Adrenals.....[1.2E-05]
Breast.....[6.0E-06]	Stomach Wall.[7.3E-06]	SI Wall.....[9.5E-06]
ULI Wall.....[2.9E-05]	LLI Wall.....[7.1E-05]	Bladder Wall.[3.0E-06]
Thymus.....[3.9E-06]	Esophagus....[3.9E-06]	Muscle.....[6.0E-06]
Kidneys.....[9.9E-06]	Testes.....[7.3E-02]	Uterus.....[3.3E-06]
Pancreas.....[1.1E-05]	Brain.....[6.1E-06]	

Inhalation : 9.98E-02 (Plume Passage)
Submersion : 4.56E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 1.70E-01

1.000 2.5E-01 2.3E+06 1.1E+03 1.1E-07 00:06

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 1.000 km

Skin.....[3.8E-06]	Lung.....[3.8E-02]	thyroid.....[3.3E-06]
Surface Bone.[4.5E+00]	Red Marrow...[3.6E-01]	Liver.....[8.1E-01]
Spleen.....[4.2E-06]	Ovaries.....[6.7E-02]	Adrenals.....[1.1E-05]
Breast.....[5.5E-06]	Stomach Wall.[6.7E-06]	SI Wall.....[8.7E-06]
ULI Wall.....[2.6E-05]	LLI Wall.....[6.5E-05]	Bladder Wall.[2.8E-06]
Thymus.....[3.5E-06]	Esophagus....[3.5E-06]	Muscle.....[5.5E-06]
Kidneys.....[9.1E-06]	Testes.....[6.7E-02]	Uterus.....[3.0E-06]
Pancreas.....[9.7E-06]	Brain.....[5.6E-06]	

Inhalation : 9.06E-02 (Plume Passage)
Submersion : 4.19E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 1.58E-01

1.400 1.0E-01 1.6E+06 2.8E+02 2.7E-08 00:09

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 1.400 km

Skin.....[1.6E-06]	Lung.....[1.6E-02]	thyroid.....[1.4E-06]
Surface Bone.[1.9E+00]	Red Marrow...[1.5E-01]	Liver.....[3.4E-01]
Spleen.....[1.7E-06]	Ovaries.....[2.8E-02]	Adrenals.....[4.7E-06]
Breast.....[2.3E-06]	Stomach Wall.[2.8E-06]	SI Wall.....[3.6E-06]
ULI Wall.....[1.1E-05]	LLI Wall.....[2.7E-05]	Bladder Wall.[1.2E-06]
Thymus.....[1.5E-06]	Esophagus....[1.5E-06]	Muscle.....[2.3E-06]
Kidneys.....[3.8E-06]	Testes.....[2.8E-02]	Uterus.....[1.3E-06]
Pancreas.....[4.0E-06]	Brain.....[2.3E-06]	

Inhalation : 6.51E-02 (Plume Passage)
Submersion : 1.89E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 3.80E-02

1.500 9.2E-02 1.5E+06 2.2E+02 2.2E-08 00:09

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 1.500 km

Skin.....[1.4E-06]	Lung.....[1.4E-02]	thyroid.....[1.2E-06]
Surface Bone.[1.7E+00]	Red Marrow...[1.3E-01]	Liver.....[3.0E-01]
Spleen.....[1.6E-06]	Ovaries.....[2.5E-02]	Adrenals.....[4.2E-06]
Breast.....[2.0E-06]	Stomach Wall.[2.5E-06]	SI Wall.....[3.2E-06]
ULI Wall.....[9.8E-06]	LLI Wall.....[2.4E-05]	Bladder Wall.[1.0E-06]
Thymus.....[1.3E-06]	Esophagus....[1.3E-06]	Muscle.....[2.0E-06]
Kidneys.....[3.4E-06]	Testes.....[2.5E-02]	Uterus.....[1.1E-06]
Pancreas.....[3.6E-06]	Brain.....[2.1E-06]	

Inhalation : 6.08E-02 (Plume Passage)
Submersion : 1.70E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 3.10E-02

2.000 6.2E-02 1.1E+06 1.2E+02 1.1E-08 00:13

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 2.000 km

Skin.....[9.5E-07]	Lung.....[9.5E-03]	thyroid.....[8.3E-07]
Surface Bone.[1.1E+00]	Red Marrow...[9.0E-02]	Liver.....[2.0E-01]
Spleen.....[1.0E-06]	Ovaries.....[1.7E-02]	Adrenals.....[2.8E-06]
Breast.....[1.4E-06]	Stomach Wall.[1.7E-06]	SI Wall.....[2.2E-06]
ULI Wall.....[6.6E-06]	LLI Wall.....[1.6E-05]	Bladder Wall.[6.9E-07]
Thymus.....[8.8E-07]	Esophagus....[8.8E-07]	Muscle.....[1.4E-06]
Kidneys.....[2.3E-06]	Testes.....[1.7E-02]	Uterus.....[7.6E-07]
Pancreas.....[2.4E-06]	Brain.....[1.4E-06]	

Inhalation : 4.59E-02 (Plume Passage)
Submersion : 1.17E-09 (Plume Passage)
Resuspension: 1.60E-02

2.400 5.0E-02 9.6E+05 8.4E+01 8.3E-09 00:15

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 2.400 km

Skin.....[7.6E-07]	Lung.....[7.7E-03]	thyroid.....[6.7E-07]
Surface Bone.[9.0E-01]	Red Marrow...[7.2E-02]	Liver.....[1.6E-01]
Spleen.....[8.5E-07]	Ovaries.....[1.4E-02]	Adrenals.....[2.3E-06]
Breast.....[1.1E-06]	Stomach Wall.[1.4E-06]	SI Wall.....[1.7E-06]
ULI Wall.....[5.3E-06]	LLI Wall.....[1.3E-05]	Bladder Wall.[5.6E-07]
Thymus.....[7.1E-07]	Esophagus....[7.1E-07]	Muscle.....[1.1E-06]
Kidneys.....[1.8E-06]	Testes.....[1.4E-02]	Uterus.....[6.1E-07]
Pancreas.....[2.0E-06]	Brain.....[1.1E-06]	

Inhalation : 3.84E-02 (Plume Passage)
Submersion : 9.52E-10 (Plume Passage)
Resuspension: 1.16E-02

2.500	4.8E-02	9.2E+05	7.9E+01	7.8E-09	00:16

Target Organ	Committed Dose Equivalent (Sv),	at Location		2.500	km
Skin.....	[7.3E-07]	Lung.....	[7.3E-03]	thyroid.....	[6.4E-07]
Surface Bone.	[8.6E-01]	Red Marrow...	[6.9E-02]	Liver.....	[1.6E-01]
Spleen.....	[8.1E-07]	Ovaries.....	[1.3E-02]	Adrenals.....	[2.2E-06]
Breast.....	[1.1E-06]	Stomach Wall.	[1.3E-06]	SI Wall.....	[1.7E-06]
ULI Wall.....	[5.1E-06]	LLI Wall.....	[1.3E-05]	Bladder Wall.	[5.3E-07]
Thymus.....	[6.8E-07]	Esophagus....	[6.8E-07]	Muscle.....	[1.1E-06]
Kidneys.....	[1.7E-06]	Testes.....	[1.3E-02]	Uterus.....	[5.8E-07]
Pancreas.....	[1.9E-06]	Brain.....	[1.1E-06]		

Inhalation :	3.69E-02 (Plume Passage)				
Submersion :	9.10E-10 (Plume Passage)				
Resuspension:	1.09E-02				

10.000	8.6E-03	2.1E+05	6.5E-01	6.4E-11	01:06

Target Organ	Committed Dose Equivalent (Sv),	at Location		10.000	km
Skin.....	[1.3E-07]	Lung.....	[1.3E-03]	thyroid.....	[1.1E-07]
Surface Bone.	[1.6E-01]	Red Marrow...	[1.2E-02]	Liver.....	[2.8E-02]
Spleen.....	[1.5E-07]	Ovaries.....	[2.3E-03]	Adrenals.....	[3.9E-07]
Breast.....	[1.9E-07]	Stomach Wall.	[2.3E-07]	SI Wall.....	[3.0E-07]
ULI Wall.....	[9.1E-07]	LLI Wall.....	[2.3E-06]	Bladder Wall.	[9.6E-08]
Thymus.....	[1.2E-07]	Esophagus....	[1.2E-07]	Muscle.....	[1.9E-07]
Kidneys.....	[3.1E-07]	Testes.....	[2.3E-03]	Uterus.....	[1.1E-07]
Pancreas.....	[3.4E-07]	Brain.....	[1.9E-07]		

Inhalation :	8.49E-03 (Plume Passage)				
Submersion :	1.74E-10 (Plume Passage)				
Resuspension:	8.91E-05				

20.000	3.7E-03	9.1E+04	2.7E-01	2.7E-11	02:13

Target Organ	Committed Dose Equivalent (Sv),	at Location		20.000	km
Skin.....	[5.6E-08]	Lung.....	[5.6E-04]	thyroid.....	[4.9E-08]
Surface Bone.	[6.7E-02]	Red Marrow...	[5.3E-03]	Liver.....	[1.2E-02]
Spleen.....	[6.2E-08]	Ovaries.....	[1.0E-03]	Adrenals.....	[1.7E-07]
Breast.....	[8.2E-08]	Stomach Wall.	[1.0E-07]	SI Wall.....	[1.3E-07]
ULI Wall.....	[3.9E-07]	LLI Wall.....	[9.7E-07]	Bladder Wall.	[4.1E-08]
Thymus.....	[5.2E-08]	Esophagus....	[5.2E-08]	Muscle.....	[8.2E-08]
Kidneys.....	[1.3E-07]	Testes.....	[1.0E-03]	Uterus.....	[4.5E-08]
Pancreas.....	[1.4E-07]	Brain.....	[8.3E-08]		

Inhalation :	3.64E-03 (Plume Passage)				
Submersion :	7.45E-11 (Plume Passage)				
Resuspension:	3.77E-05				

47.000 1.0E-03 2.6E+04 7.8E-02 7.7E-12 05:12

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 47.000 km

Skin.....[1.6E-08]	Lung.....[1.6E-04]	thyroid.....[1.4E-08]
Surface Bone.[1.9E-02]	Red Marrow...[1.5E-03]	Liver.....[3.4E-03]
Spleen.....[1.8E-08]	Ovaries.....[2.8E-04]	Adrenals.....[4.8E-08]
Breast.....[2.3E-08]	Stomach Wall.[2.8E-08]	SI Wall.....[3.7E-08]
ULI Wall.....[1.1E-07]	LLI Wall.....[2.8E-07]	Bladder Wall.[1.2E-08]
Thymus.....[1.5E-08]	Esophagus....[1.5E-08]	Muscle.....[2.3E-08]
Kidneys.....[3.8E-08]	Testes.....[2.8E-04]	Uterus.....[1.3E-08]
Pancreas.....[4.1E-08]	Brain.....[2.4E-08]	

Inhalation : 1.04E-03 (Plume Passage)
Submersion : 2.12E-11 (Plume Passage)
Resuspension: 1.08E-05

50.000 9.4E-04 2.3E+04 7.0E-02 6.9E-12 05:32

Target Organ Committed Dose Equivalent (Sv), at Location 50.000 km

Skin.....[1.4E-08]	Lung.....[1.4E-04]	thyroid.....[1.3E-08]
Surface Bone.[1.7E-02]	Red Marrow...[1.4E-03]	Liver.....[3.1E-03]
Spleen.....[1.6E-08]	Ovaries.....[2.6E-04]	Adrenals.....[4.3E-08]
Breast.....[2.1E-08]	Stomach Wall.[2.6E-08]	SI Wall.....[3.3E-08]
ULI Wall.....[1.0E-07]	LLI Wall.....[2.5E-07]	Bladder Wall.[1.1E-08]
Thymus.....[1.3E-08]	Esophagus....[1.3E-08]	Muscle.....[2.1E-08]
Kidneys.....[3.4E-08]	Testes.....[2.6E-04]	Uterus.....[1.2E-08]
Pancreas.....[3.7E-08]	Brain.....[2.1E-08]	

Inhalation : 9.33E-04 (Plume Passage)
Submersion : 1.91E-11 (Plume Passage)
Resuspension: 9.68E-06