

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

GABRIEL FIDALGO QUEIRÓZ DA SILVA

**MODELAGEM PARA ESTIMATIVA DE IMPACTO FINANCEIRO PARA
TRATAMENTO DE CÂNCER RADIOINDUZIDO AO PÚBLICO EM CENÁRIO RDD**

**Rio de Janeiro
2015**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

GABRIEL FIDALGO QUEIRÓZ DA SILVA

**MODELAGEM PARA ESTIMATIVA DE IMPACTO FINANCEIRO PARA
TRATAMENTO DE CÂNCER RADIOINDUZIDO AO PÚBLICO EM
CENÁRIO RDD**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc.
Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva
Junior – D.Sc.

Rio de Janeiro

2015

c 2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha.

Rio de Janeiro - RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

621.48	Silva, Gabriel Fidalgo Queiróz da
S586m	Modelagem para estimativa de impacto financeiro para tratamento de câncer radioinduzido ao público em cenário RDD / Gabriel Fidalgo Queiróz da Silva, orientado por Edson Ramos de Andrade e Wilson Freitas Rebello da Silva Júnior – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.
	69p.: il.
	Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
	1. Curso de Engenharia Nuclear – teses e dissertações. 2. Radiação ionizante. 3. Câncer. I. Andrade, Edson Ramos de. II. Silva Júnior, Wilson Freitas Rebello da. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

GABRIEL FIDALGO QUEIRÓZ DA SILVA

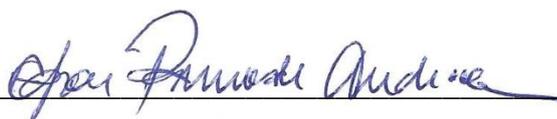
**MODELAGEM PARA ESTIMATIVA DE IMPACTO FINANCEIRO PARA
TRATAMENTO DE CÂNCER RADIOINDUZIDO AO PÚBLICO EM
CENÁRIO RDD**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc.

Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior – D.Sc.

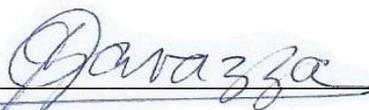
Aprovada em 09 de Fevereiro de 2015, pela seguinte Banca Examinadora:



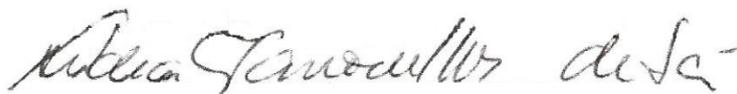
Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc. do IME – Presidente



Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior – D.Sc. do IME



Prof. Sérgio Gavazza – Ph.D. do IME



Profª. Lidia Vasconcellos de Sá – D.Sc. do IRD



Pesq. Helio de Carvalho Vital – Ph.D. do CTEEx

Rio de Janeiro

2015

À minha avó Davina por ter me ensinado a buscar a
felicidade independentemente de qualquer problema.
Vó, onde a senhora estiver, obrigado por tudo!
Te amo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria de Fátima e Luiz Aldir por todo amor e carinho dedicado a mim, pelo apoio e incentivo dado aos meus estudos e por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos. Muito obrigado!

A minha noiva e grande amiga Emmanuele Macaciel, por todas as ideias, sugestões e apoio para que eu fizesse o mestrado. Agradeço também por toda ajuda na revisão textual da pesquisa. Obrigado Manu!

Ao IME, por permitir e incentivar esta pesquisa, colocando à disposição o material necessário para que fosse possível esta realização.

Aos meus orientadores Dr. Edson Ramos de Andrade e Dr. Wilson Freitas Rebello da Silva Júnior, por toda paciência e disposição em me orientar, dispondo de toda sabedoria e experiência para que fosse feito sempre o melhor na pesquisa, independentemente da hora ou local em que estivessem. Obrigado!

Aos colegas Olga Araújo, Fagner Rother, Thiago Belo, Ison Gradim, Raphael Marques, João Lúcio Mação, Rodrigo Werner e Célio Simonacci por toda ajuda e companheirismo nos estudos.

A Deus e meus guias espirituais por tudo.

“Aos outros, dou o direito de serem como são. A mim, dou o dever de ser cada dia melhor”.

Francisco Cândido Xavier

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	11
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Radiação ionizante	16
1.2 Atividade	18
1.3 Meia-vida e Constante de Decaimento	19
1.4 Dose de radiação	19
1.4.1 Dose absorvida (D)	19
1.4.2 Dose equivalente (H_T)	20
1.4.3 Dose efetiva (E)	20
1.4.4 Dose total efetiva (<i>Total effective dose</i> – TED)	21
1.4.5 Dose coletiva (S_E)	21
1.5 Exposição ($E(x)$)	21
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral	22
2.2 Objetivos específicos	22
3 FUNDAMENTOS	23
3.1 <i>HotSpot Health Physics Codes</i> – Versão 3.0	23
3.1.1 Distribuição gaussiana	24
3.1.2 Utilização da distribuição gaussiana pelo código HotSpot	24
3.1.3 Programa HotSpot Versão 3.0	26
3.2 Leucemia	26
3.2.1 Tratamento	27
3.3 <i>Biological Effects of Ionizing Radiation: Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation</i> (BEIR V)	28
3.3.1 Probabilidade de causa (PC)	29

3.4	Ações assimétricas	30
3.4.1	Dispositivo de dispersão radiológica (RDD)	31
4	DESENVOLVIMENTO	32
4.1	Metodologia	32
4.2	O cenário de exposição	34
4.3	Análise do evento	35
5	RESULTADO E DISCUSSÃO	45
5.1	Dados de saída do HotSpot	45
5.2	Análise demográfica	48
5.3	ERR e PC	49
5.4	Impacto financeiro	51
5.5	Metodologia para estimativa de impacto de financeiro	56
6	CONCLUSÃO	59
7	REFERÊNCIAS	61
8	APÊNDICE	67
8.1	Análise de evento radiológico	68

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1 Espectro eletromagnético da radiação	17
FIG. 1.2 Categorização simplificada das radiações	18
FIG. 3.1 Esquema de uma bomba suja (RDD)	31
FIG. 4.1 Localização do Parque dos Atletas e do Riocentro	34
FIG. 5.1 Pluma de contaminação em escala de 200 km	45
FIG. 5.2 Pluma de contaminação em escala de 5 km	46
FIG. 5.3 Pluma de contaminação em escala de 200 km e na direção 130°	47
FIG. 5.4 Dose em função da distância da linha central	47
FIG. 5.5 Distribuição da população por gênero, segundo os grupos de idade no município do Rio de Janeiro	48
FIG. 5.6 PC em função do ERR nas três plumas de isodoses (Masculino)	51
FIG. 5.7 PC em função do ERR nas três plumas de isodoses (Feminino)	51
FIG. 5.8 Número de CN em função da TED	53
FIG. 5.9 Custos em função da TED nos indivíduos irradiados	56
FIG. 5.10 Metodologia para estimativa de impacto financeiro em cenário RDD	56

LISTA DE TABELAS

TAB. 1.1 Fatores de peso da radiação	20
TAB. 3.1 Funções para o cálculo de ERR para leucemia	29
TAB. 4.1 Composição do cenário modelado	36
TAB. 4.2 Composição do cenário modelado (cont. TAB. 4.1)	36
TAB. 4.3 Composição do cenário modelado (cont. TAB. 4.2)	37
TAB. 4.4 Composição do cenário modelado (cont. TAB. 4.3)	37
TAB. 4.5 Apresentação das características dos ventos, segundo HotSpot 3.0	39
TAB. 4.6 Condições meteorológicas para a definição da estabilidade atmosférica, separadas de A a F, segundo o HotSpot 3.0	40
TAB. 4.7 Principais diferenças estabelecidas entre a ICRP 26/30 e a ICRP 60/66	41
TAB. 4.8 Ações de proteção, doses de referência e legislação pertinente para as fases de resposta	42
TAB. 4.9 Limites de dose definidos pela CNEN	43
TAB. 5.1 Valores da densidade demográfica do município Rio de Janeiro, segundo o Censo 2010, divisão por faixa etária e gênero	49
TAB. 5.2 Áreas atingidas e número aproximado de habitantes	49
TAB. 5.3 Valor de ERR e PC para exposição na pluma interna	50
TAB. 5.4 Valor de ERR e PC para exposição na pluma mediana	50
TAB. 5.5 Valor de ERR e PC para exposição na pluma externa	50
TAB. 5.6 Número de casos novos a partir do ERR	53
TAB. 5.7 Valores estimados a partir do número de casos novos	54
TAB. 5.8 Totais por pluma, gênero e ECC de valores estimados para casos novos	55
TAB. 5.9 Custo pela linha de base (C _{LB}) e pelo ERR (EC)	55
TAB. 8.1 Descrição do cenário modelado	68
TAB. 8.2 Descrição do cenário modelado (cont. TAB. 8.1)	69
TAB. 8.3 Descrição do cenário modelado (cont. TAB. 8.2)	69
TAB. 8.4 Descrição do cenário modelado (cont. TAB. 8.3)	69

LISTA DE SIGLAS

BEIR	<i>Biological Effects of Ionizing Radiation</i>
CN	Casos Novos
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTBTO	<i>Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization</i>
EC	Excesso de Custo
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ERR	<i>Excess Relative Risk</i>
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
FGR	<i>Federal Guidance Report</i>
FIMS	<i>Field Information Management System</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
INCA	Instituto Nacional de Câncer
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
ITDB	<i>Incident and Trafficking Database</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	<i>Probability of Causation</i>
RDD	<i>Radiological Dispersive Device</i>
SIU	Sistema Internacional de Unidades
SUS	Sistema Único de Saúde
TBI	<i>Total Body Irradiation</i>
TED	<i>Total Effective Dose</i>
TNT	Trinitrotolueno
UNE	<i>Underground Nuclear Explosion</i>

RESUMO

No contexto da Engenharia Nuclear, na linha de pesquisa Controle Ambiental, este trabalho tem como objetivo propor metodologia que seja capaz de estimar impactos financeiros a partir da análise de eventos de crise e emergência radiológica. Situações em que ocorram ações assimétricas envolvendo material radioativo são importantes atualmente e uma metodologia de convergência a partir de plataformas isoladas pode apoiar e acelerar o processo decisório. Considerando um Dispositivo de Dispersão Radiológica (*Radiological Dispersive Device – RDD*) composto de pequenas quantidades de explosivos e césio-137 como material radioativo, um cenário fictício foi modelado. Considerou-se como local de deflagração do RDD o Parque dos Atletas, localizado no município do Rio de Janeiro, e que abriga eventos de grande porte. O cenário foi criado utilizando-se o código *HotSpot Health Physics Codes 3.0*, que gerou plumas de isodoses na região de deflagração do RDD com limiares estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), definindo a área contaminada e a dose total efetiva para indivíduos na região. Cálculos de excesso de risco relativo (ERR) e probabilidade de causa (PC) para indivíduos expostos foram calculados a partir do relatório *Biological Effects of Ionizing Radiation V* (BEIR V) e TECDOC-870 da Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency – IAEA*), onde, para fins de aplicação, a leucemia foi considerada como morbidade a ser analisada por possuir o menor período de latência. O impacto financeiro foi estimado de forma a possibilitar o cálculo da equivalência entre o custo neste caso e aquele previsto, considerando a incidência normal da doença. Considerou-se o tratamento por Irradiação de Corpo Inteiro (*Total Body Irradiation– TBI*), pré-tratamento para transplante de medula óssea. Desta forma, uma metodologia capaz de estimar impactos financeiros, com base em custos de tratamento, foi proposta, a fim de auxiliar no processo decisório em cenário RDD.

ABSTRACT

In the context of Nuclear Engineering, Environmental Control research line, this study aims to propose a methodology that is able to estimate the financial impact from the crisis analysis due to radiological emergency events. Asymmetric actions involving radioactive material are important and currently a convergence of methodology from single platforms can effectively support the decision-making process. Considering a Radiological Dispersal Device (Radiological Dispersive Device - RDD) which consists of small amounts of explosives and cesium-137 as radioactive material, a fictional scenario was modeled. The Athletes Park, located in the city of Rio de Janeiro and where large events are hosted, was considered as the site of the explosion of the RDD. The scene was modeled using the HotSpot Health Physics Codes 3.0 code, which generated isodoses curves down in the initiation region of RDD with thresholds in accordance with those established by the National Nuclear Energy Commission (CNEN), also defining the contaminated area and the total effective dose for individuals. Excess Relative Risk (ERR) and probability of cause (PC) of exposed individuals were calculated from the report Biological Effects of Ionizing Radiation V (BEIR V) and TECDOC-870 of the International Atomic Energy Agency (IAEA), where, for enforcement purposes, leukemia was considered due to its short period of latency. The financial impact of that disease to be induced in the simulated scenario was estimated and compared to its expected cost based on the normal incidence of the disease. Irradiation of Total Body Irradiation (TBI) was considered as a pre-treatment for bone marrow transplantation. Thus, a methodology to estimate the financial impact based on treatment costs was proposed in order to assist decision-making in a RDD scenario.

1 INTRODUÇÃO

Metodologia de convergência é aquela que propõe apoio ao processo decisório pela adição de capacidades, reunindo metodologias e/ou plataformas para soluções de problemas que são aparentemente isolados. Estudos intensivos em modelagem computacional e matemática representam um campo aberto para novas descobertas e a aplicação da metodologia de convergência no auxílio direto ao escalão de decisão em um estado de emergência constitui um desafio atual e complexo. A dificuldade maior está no fato de que as plataformas que descrevem, resolvem ou modelam os cenários, são estanques entre si. Porém, existem pontos específicos nas metodologias que podem ser unidos proporcionando dados de entradas comuns entre si. Esse processo é utilizado neste trabalho e dados de entrada para uma plataforma têm origem em outra.

O caráter inovador desta proposta está na ideia de convergência de objetivos, que busca integrar plataformas computacionais e modelos preditivos em torno de um objetivo comum. Esforços nesse sentido, ainda que não sob a mesma base metodológica, estão sendo efetuados pela CTBTO (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*), sob jurisdição da Organização das Nações Unidas (ONU), que desde o final de 2012 busca integrar uma plataforma computacional denominada FIMS (*Field Information Management System*), desenhada para unir dados de campo provenientes de diversas fontes, e prover apoio ao processo decisório sobre a existência ou não de uma UNE (*Underground Nuclear Explosion*).

Dessa forma, a utilização de uma metodologia de convergência pode acelerar o processo de aquisição de dados durante as primeiras horas de um cenário radiológico, influenciando não só a segurança das ações de emergência, como também a capacidade de previsão de aplicação de recursos disponíveis.

Um dispositivo de dispersão radiológica (*Radiological Dispersive Device – RDD*) trata-se de um artefato de combina explosivos convencionais com material radioativo, utilizado principalmente em ações assimétricas. O código *HotSpot Health Physics Codes 3.0* modela, de forma conservativa, um cenário baseado em modelos gaussianos, considerando a dispersão de radionuclídeos na atmosfera, incluindo a

modelagem de um RDD, onde fornece a área contaminada pelo evento e a dose total efetiva (*Total Effective Dose – TED*) nos indivíduos irradiados.

Utilizando este código, simulou-se um cenário RDD de modo a prever as plumas de contaminação sobre o local pós deflagração do artefato, considerando um cenário estático, onde o vento é o fator de arraste do material radioativo. O código calcula a área afetada para fornecer as plumas de contaminação.

Neste trabalho, o céσιο-137 (^{137}Cs) é utilizado como material radioativo empregado no RDD. A escolha do ^{137}Cs foi motivada por normalmente apresentar-se na forma de sal, bastante solúvel em água, e possuir alto grau de contaminação ambiental. Ademais, esse radionuclídeo já protagonizou um evento de potencial contaminação de massa no acidente radiológico em Goiânia, em 1987.

No metabolismo humano, o ^{137}Cs é semelhante ao potássio, o que confere alta capacidade de contaminação interna (PETERSON et al., 2007). Outro motivo é a possibilidade de ele ser encontrado em irradiadores industriais e, em níveis mais baixos de atividade, em equipamentos de radioterapia mais antigos, mas ainda em operação em algumas clínicas radioterápicas e laboratórios (PASCHOA, DANTAS, 2014). É comumente encontrado na forma do sal cloreto de céσιο (CsCl), podendo contaminar fontes de abastecimento de água, além de lençóis freáticos, rios e lagos.

Outros elementos potencialmente interessantes em eventos RDD seriam: o amerício-241 (^{241}Am), califórnio-252 (^{252}Cf), cobalto-60 (^{60}Co), irídio-192 (^{192}Ir), plutônio-238 (^{238}Pu), polônio-210 (^{210}Po), rádio-226 (^{226}Ra) e o estrôncio-90 (^{90}Sr) (IAEA, 2003). Esses radionuclídeos são selecionados pela portabilidade, baixa segurança em cadeia de custódia (possível obtenção de maneira ilícita), alto nível de radioatividade e forma física e química adequadas ao objetivo de causar danos a populações em liberações públicas.

O relatório *Biological Effects of Ionizing Radiation V* (BEIR V, 1990) trata de funções que estimam o valor de Excesso de Risco Relativo (*Excess Relative Risk – ERR*) e Probabilidade de Causa (PC) para diferentes morbidades, tomando como base estudos sobre sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki, tendo sido padronizado para a população americana.

Com os dados de saída proporcionados pelo código HotSpot, limites de dose estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), e a partir de equações estabelecidas pelo BEIR V, obtém-se o cálculo de ERR e PC, estimando

assim o número de casos novos (CN) por gênero e faixa etária, onde, para fim de exemplificação da metodologia proposta, será utilizada a leucemia.

A escolha do desenvolvimento de leucemia como objeto de estudo foi motivada pela rapidez com que essa doença pode se desenvolver, cerca de 2 a 3 anos após a exposição à radiação ionizante (KATO, SHIMIZU, 1992; PRESTON et al., 1994; PRESTON et al., 2004). Comparando-se com outras morbidades, a leucemia possui menor período de latência, sendo observado um período médio de 5 anos para cânceres de estômago e pulmão, 10 anos para o fígado, 12 anos para o útero, e como média para cânceres sólidos em geral, em torno de 22 anos. Esses valores referem-se a estudos realizados com sobreviventes das bombas atômicas lançadas no Japão no final da 2ª Guerra Mundial (DROPKIN, 2007). Logo, indivíduos que vierem a apresentar leucemia deverão ser os primeiros a serem tratados, sendo responsáveis pelo primeiro impacto econômico a nível de tratamento.

Este trabalho não pretende discutir somente os resultados das previsões de desenvolvimento de leucemia, mas, também, buscar fornecer elementos que contribuam para uma resposta mais ágil e que acelere o processo decisório sobre o cenário, mapeando áreas de interesse de acordo com limites de dose de radiação sobre a população estabelecidos por órgãos regulatórios internacionais e nacionais.

Com a convergência de metodologias isoladas em torno de um objetivo comum, espera-se colaborar com os escalões de decisão em emergências, agilizando o complexo processo decisório.

1.1 RADIAÇÃO IONIZANTE

A radiação em geral é 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 et al., 2013).

Didaticamente, 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 de 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 et al., 2013). Na figura 1.1, pode-se ver um esboço da distribuição de frequências de acordo com o tipo de radiação.

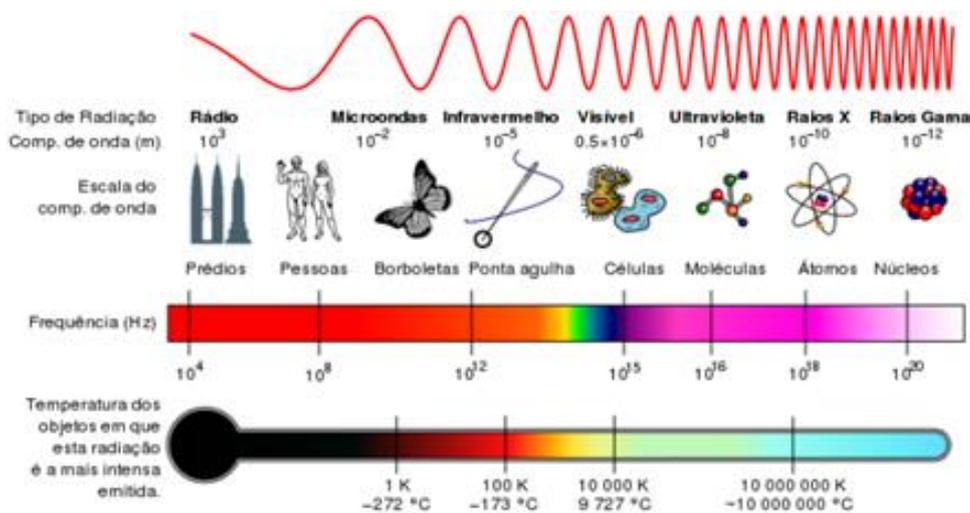


FIG. 1.1 Espectro eletromagnético da radiação (VILLATE, 2013)

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 et al., 2013).

O esquema da figura 1.2 mostra uma categorização simplificada das radiações.

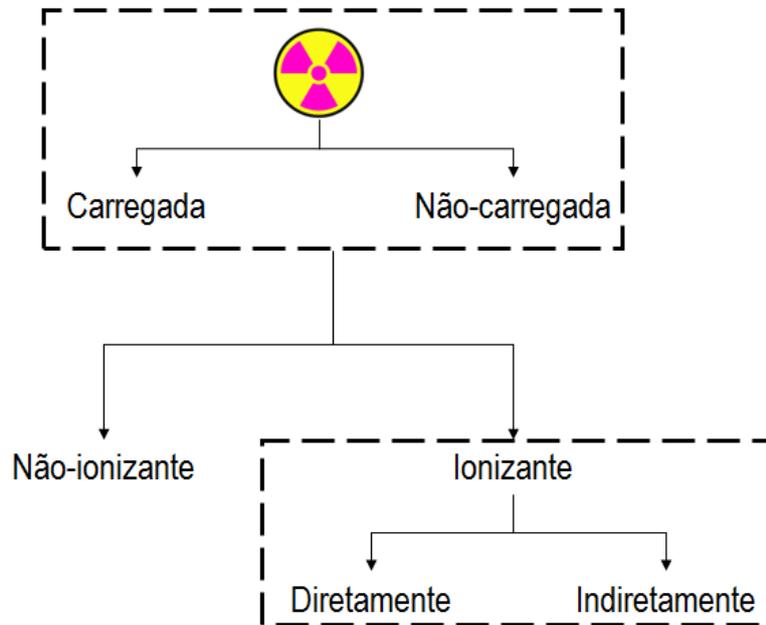


FIG. 1.2 Categorização simplificada das radiações.

1.2 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 ^{226}Ra . Portanto, tem-se que: $1,0 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

1.3 MEIA-VIDA E CONSTANTE DE DECAIMENTO

Entende-se por meia-vida (λ) o período necessário para que 50% dos átomos iniciais de um radionuclídeo decaiam. 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 λ não ser constante (FISCHBACH et al., 2012).

1.4 DOSE DE RADIAÇÃO

No Brasil, a norma CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica (CNEN, 2011) define o conceito de dose e dá subclassificação. 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, além do (f) conceito de exposição.

1.4.1 DOSE ABSORVIDA (D)

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

1.4.2 DOSE EQUIVALENTE (H_T)

Grandeza expressa por $H_T = D_T w_R$, sendo D_T a dose absorvida média em determinado órgão ou tecido e w_R o fator de ponderação da radiação. De acordo com o SIU, a unidade de medida para dose equivalente é o sievert (Sv). O fator de ponderação da radiação obedece a regras pré-estabelecidas e possui valores fixos para diferentes tipos de radiações. A tabela 1.1 fornece os valores dos fatores de peso das radiações, de acordo com a Posição Regulatória 3.01/002:2011 da CNEN.

TAB. 1.1 Fatores de peso da radiação (CNEN: Posição Regulatória 3.01/002, 2011).

Tipo e faixa de energia ^[a]	Valores de w_R ^[b]
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e muons, todas as energias ^[c]	1
Nêutrons ^[d] , energia:	
< 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Prótons, exceto de recuo, energia:	
> 2 MeV	5
Partículas α , fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

[a] Valores para outras radiações podem ser obtidos pelo Anexo A da ICRP-60.

[b] Todos os valores se relacionam à radiação incidente no corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

[c] Excluindo elétrons *Auger* emitidos por radionuclídeos ligados ao DNA, para os quais se aplicam considerações especiais de microdosimetria.

[d] Para consistência nos cálculos, pode-se usar a seguinte expressão para a estimativa de w_R para nêutrons, em função da energia: $w_R = 5 + 17 \exp[-(\ln 2 \epsilon)^2 / 6]$, onde ϵ é a energia em MeV.

1.4.3 DOSE EFETIVA (E)

É definida como a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos. Matematicamente, é caracterizada pela relação $E = \sum_T w_T H_T$, sendo H_T a

dose equivalente no tecido ou órgão e w_T o fator de ponderação do tecido ou órgão. Sua unidade pelo SIU é o sievert (Sv).

1.4.4 DOSE TOTAL EFETIVA (*TOTAL EFFECTIVE DOSE* – TED)

A TED pode ser definida como a soma da dose efetiva (exposições externas) e a dose equivalente comprometida (exposições internas) (U.S. NRC, 2014).

1.4.5 DOSE COLETIVA (S_E)

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 x sievert (pessoa.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 \$10.000,00 (dez mil dólares americanos) por unidade de dose coletiva, ou seja \$10.000,00/pessoa.Sv.

1.5 EXPOSIÇÃO

Chama-se Exposição o ato ou condição de estar submetido à radiação ionizante (CNEN, 2011).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor metodologia para a modelagem de consequências, incluindo simulação de custos financeiros em evento RDD. Como exemplo de aplicação da metodologia proposta, apresenta-se o tratamento de leucemia radioinduzida por exposição externa a fótons em um cenário com deflagração de RDD.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Utilizar os modelos matemáticos do BEIR V para determinar o excesso de risco para leucemia radioinduzida por exposição externa de corpo inteiro a fótons do evento RDD simulado a partir das plumas de isodoses fornecidas pelo HotSpot;
- b. Estimar o impacto financeiro decorrente do tratamento de leucemia radioinduzida, com base em tabela de custos nacionais de tratamento apresentados pelo Sistema Único de Saúde brasileiro (SUS).

3 FUNDAMENTOS

3.1 HOTSPOT HEALTH PHYSICS CODES – VERSÃO 3.0

Desde 1988, o código HotSpot vem sendo distribuído pelo *National Atmospheric Release Advisory Center*, do *Lawrence Livermore National Laboratory*, situado na Califórnia, Estados Unidos da América.

O programa fornece aproximação dos efeitos da radiação ionizante quando materiais radioativos são liberados para a atmosfera. Foi criado como recurso de apoio na definição de uma resposta rápida em situações de emergência, provendo equipes técnicas e de planejamento um conjunto portátil de ferramentas computacionais para avaliar o cenário. É também utilizado para a análise de segurança em instalações de manuseio de material radioativo, avaliações de impactos de incidentes radiológicos e/ou nucleares, e análise de possíveis efeitos e estudos sobre potenciais desdobramentos de ações envolvendo um RDD.

Em relação às condições do terreno, os modelos de dispersão atmosférica utilizados neste trabalho são projetados para estudar liberações na superfície, considerando uma liberação radioativa em terreno desobstruído e condições meteorológicas classificadas na categorização de Pasquill (HOMANN, 2013), incluindo velocidade e direção do vento, chuva, temperatura, presença de nuvens, etc. Estes modelos fornecem meios rápidos, embora conservativos, para a estimativa dos efeitos da radiação associados ao cenário. Dados de entrada utilizados neste trabalho são apresentados na tabela 4.2.

Os algoritmos utilizados no HotSpot se utilizam de modelos gaussianos semi-empíricos para simular a dispersão de radionuclídeos no ambiente e calcular as doses, geralmente superestimadas, portanto, trata-se de um método conservativo (HOMANN, 2013). Para estudos realistas, onde se dispõe de mais tempo para computação e discussão, modelos não-gaussianos são mais adequados.

3.1.1 DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA

A distribuição gaussiana, também chamada de distribuição de Gauss ou Normal, é considerada uma das principais distribuições contínuas estatísticas, sendo utilizada em diversos ramos da Estatística, Economia e Física.

O modelo possui utilidade em outras aplicações, como a descrição de fenômenos físicos e de comportamento do setor financeiro. Probabilidades em geral podem ser determinadas a partir de distribuições gaussianas, quando conhecidos parâmetros como média e desvio-padrão das variáveis. A distribuição gaussiana pode ser definida, a partir de um conjunto de variáveis, da seguinte forma (LANDIM, 2003):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

onde:

x = Variável aleatória;

μ = Média do conjunto de variáveis;

σ = Desvio-padrão do conjunto de variáveis.

3.1.2 UTILIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA PELO CÓDIGO HOTSPOT

O modelo gaussiano tem sido amplamente utilizado e testado, e ainda é a ferramenta básica para os cálculos iniciais de dispersão atmosférica (HOMANN, 2009; JEONG et al., 2010; RESHETIN, 1995). A origem do modelo gaussiano para esse fim remonta ao ano de 1932 e é descrita por Sutton (SUTTON, 1932). Esse modelo geralmente produz resultados que concordam razoavelmente com dados experimentais (YVES et al., 2012), podendo determinar a concentração atmosférica de um gás ou um aerossol em qualquer ponto do espaço, sendo apresentado em forma algébrica pelo programa HotSpot:

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

Sendo, (a) C, a concentração atmosférica integrada no tempo (Ci.s)/(m³); (b) Q, a atividade da fonte (Ci); (c) H, a altura efetiva de lançamento (m); (d) λ, a constante de decaimento radioativo (s⁻¹); (e) x, a distância percorrida na direção do vento (m); (f) y, a distância perpendicular à direção do vento (m); (g) z, a distância do eixo vertical (m); (h) σ_y, o desvio padrão da distribuição de concentração integrada na direção perpendicular à do vento (m); (i) σ_z, o desvio padrão da distribuição de concentração integrada na direção vertical (m); (j) u, a velocidade média do vento na altura de liberação efetiva do material (m/s) e; (k) DF (x), o fator de depleção da pluma. Nas rotinas do HotSpot, a origem de coordenadas está localizada ao nível do solo, com as coordenadas de liberação do radionuclídeo em (x = 0, y = 0, z = 0).

A equação utilizada pelo HotSpot para o cálculo do fator de depleção da pluma (DF (x)) é a seguinte:

$$DF(x) = \left[\exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x) \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} dx \right]^{\frac{v}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (3)$$

Onde (a) v é a velocidade de deposição (m/s) do material radioativo e (b) σ_z (x) é o desvio padrão da distribuição de concentração de ar na direção vertical (eixo z) para qualquer terreno padrão (ajustado para a altura de rugosidade da superfície, se for o caso) ou terreno da cidade em análise, as demais variáveis estão em conformidade com a equação 2.

Como o modelo gaussiano geralmente produz resultados que, apesar de serem geralmente apresentados de forma conservativa, concordam com dados experimentais, sendo aceito pela Agência de Proteção Ambiental (EPA, 1978). A origem do modelo gaussiano é encontrada também em trabalhos realizados por Pasquill (1961, 1974), e Gifford (1975).

3.1.3 PROGRAMA HOTSPOT VERSÃO 3.0

O HotSpot 3.0 calcula a TED 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: 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 fornece resultados na forma de tabelas e plumas de isodoses.

3.2 LEUCEMIA

O câncer é uma doença crônica e multicausal, causada pelo crescimento descontrolado de células (GARÓFOLO et al., 2004). Em crianças, o câncer representa em média 2% das morbidades, afetando principalmente as células do sistema hematopoiético e os tecidos de sustentação, sendo a leucemia o tipo de neoplasia mais comum em crianças (SILVA et al., 2002). Segundo o Instituto Nacional de Câncer (INCA), no Brasil, durante o ano de 2011, ocorreram 6.187 óbitos por leucemia, sendo 3.277 homens e 2.910 mulheres. Para o ano de 2014, estimou-se 11.370 novos casos de leucemia, sendo 5.050 em homens e 4.320 em mulheres, correspondendo a um risco estimado de 5,20 novos casos para cada 100 mil homens e de 4,24 novos casos para cada 100 mil mulheres (INCA, 2014).

A leucemia é uma doença dos glóbulos brancos com origem desconhecida na maioria das vezes. Tem como principal característica o acúmulo de células jovens anormais na medula óssea, que substituem as células sanguíneas normais. Na medula óssea são encontradas as células precursoras, que originam os elementos do sangue (MACHADO, 2003).

Apenas alguns fatores são reconhecidos como possíveis causas de leucemia. Eles parecem estar ligados ao surgimento da morbidade, dentre os quais figuram o tabagismo, herança genética, contaminação por certos tipos de vírus e exposição à radiação ionizante (ABC.MED.BR, 2012).

Os primeiros indícios de que a exposição à radiação ionizante ocasionava o desenvolvimento de leucemia foram de estudos realizados com sobreviventes dos bombardeios atômicos de Hiroshima e Nagasaki durante a 2ª Guerra Mundial. Também é notável maior incidência em pacientes expostos à radioterapia, podendo ser considerada potencial efeito secundário ao tratamento (PRESTON et al., 1994; PRESTON et al., 2004).

A leucemia pode ser dividida em tipos e subtipos, onde a velocidade de evolução da doença no indivíduo e o tipo de células envolvidas são fatores para sua classificação (GUIMARÃES, 2012). Sob esse aspecto, a doença pode ser do tipo crônica, com agravamento lento, ou aguda, com agravamento rápido (LEAL, FILHO, 2002). A leucemia é agrupada em subtipos, dividindo-se em linfóides e mielóides, dependendo do tipo de célula que afeta no organismo do indivíduo (HAMERSCHLAK, 2008; LEAL, FILHO, 2002). Em particular, a radiação ionizante pode ser uma das causas para leucemia mielóide aguda, crônica, e leucemia linfóide aguda, podendo então ser responsável por grande (INCA, 2014).

3.2.1 TRATAMENTO

Tem o objetivo de destruir as células leucêmicas, para que a medula óssea volte a produzir células normais. Por não se tratar de um câncer sólido, os principais tratamentos para a leucemia são a quimioterapia, irradiação de corpo inteiro (*total body irradiation* – TBI) e, em alguns casos, o transplante de medula. O tratamento tende a ser continuado na maioria dos casos. A indicação para continuidade ocorre pelo possível número de células leucêmicas que podem restar no organismo do paciente, diminuindo as chances de metástase no indivíduo (INCA, 2007).

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

O relatório BEIR V é um conjunto de modelos de análise de risco para cânceres que dependem da dose efetiva, gênero, idade e período de latência de morbidades para indivíduos expostos à radiação ionizante. Toma como princípio 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 V considera resultados padronizados para a população americana mas que, para estudos como este, podem ser aproximados.

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

O relatório BEIR V apresenta um modelo geral para o cálculo do risco de cânceres ($\gamma(d)$), representado a seguir:

$$\gamma(d) = \gamma_0 [1 + f(d)g(\beta)] \quad (4)$$

Onde γ_0 é a linha de base para ocorrência da morbidade em estudo; $f(d)$ é um modelo matemático que mostra relação com a dose (d), sendo $f(d) = \alpha_1 d$ um modelo linear e $f(d) = \alpha_2 d + \alpha_3 d^2$ um modelo linear-quadrático. O que determina o modelo a ser utilizado é a morbidade a ser estudada. A função $g(\beta)$ é o excesso do risco relativo (*Excess Relative Risk – ERR*) e indica o percentual acima da linha de base, para a população exposta à radiação.

Contudo, a leucemia foi utilizada como exemplo para o cenário escolhido, por apresentar um dos menores períodos de latência. O relatório BEIR V apresenta as seguintes funções $f(d)$ e $g(\beta)$ para o cálculo de risco relativo para a leucemia:

$$f(d) = \alpha_2 d + \alpha_3 d^2 \quad (5)$$

$$g(\beta) = \begin{cases} \exp[\beta_1 I(T \leq 15) + \beta_2 I(15 < T \leq 25)] & \text{se } E \leq 20 \\ \exp[\beta_3 I(T \leq 25) + \beta_4 I(25 < T \leq 30)] & \text{se } E > 20 \end{cases} \quad (6)$$

Sendo: $\alpha_2 = 0,243 \text{ Sv}^{-1}$, $\alpha_3 = 0,271 \text{ Sv}^{-1}$, $\beta_1 = 4,885$, $\beta_2 = 2,380$, $\beta_3 = 2,367$, $\beta_4 = 1,638$, T o período de latência em anos e E a idade em que o indivíduo foi exposto.

Entretanto, a IAEA divide tais funções de acordo com a faixa etária, período de latência e gênero, em conformidade com o relatório TECDOC 870 (IAEA, 1996). A tabela 3.1 apresenta funções para determinação do ERR referentes à leucemia:

TAB. 3.1 Funções para o cálculo do ERR para a leucemia (IAEA, 1996).

<u>Gênero Masculino</u>	
$ERR(D,t,e,s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,33(D+0,79D^2)\exp[-0,17(t-$	para $e < 20$ (7)
$ERR(D,t,e,s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,48(D+0,79D^2)\exp[-0,13(t-$	para $20 \leq e < 40$ (8)
$ERR(D,t,e,s) = F(D)\beta(t,e,s) = 1,31(D+0,79D^2)\exp[-0,07(t-$	para $e \geq 40$ (9)
<u>Gênero Feminino</u>	
$ERR(D,t,e,s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,66(D+0,79D^2)\exp[-0,07(t-$	para $e < 20$ (10)
$ERR(D,t,e,s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,97(D+0,79D^2)\exp[-0,03(t-$	para $20 \leq e < 40$ (11)
$ERR(D,t,e,s) = F(D)\beta(t,e,s) = 2,64(D+0,79D^2)\exp[0,03(t-2$	para $e \geq 40$ (12)

Onde: (a) $ERR(D,t,e,s)$ é o Excesso de Risco Relativo, em função da dose total efetiva (D, em sieverts), latência (t, em anos), idade em que foi exposto (e, em anos) e gênero do indivíduo (s); (b) $F(D)$ é a Função linear-quadrática (leucemia) em função da dose equivalente; (c) $\beta(t,e,s)$ é o Risco Relativo (RR) em função da latência, idade em que foi exposto à radiação e gênero do indivíduo. Para leucemia, é mais apropriado o termo Risco Absoluto, pois ainda não foi encontrado para esta morbidade um modelo que se encaixe apropriadamente às funções matemáticas. Portanto, ao utilizar o Risco Absoluto, leva-se em consideração maiores erros, já que esse modelo ainda não é adequado para leucemia (IAEA, 1996).

3.3.1 PROBABILIDADE DE CAUSA (PC)

A Probabilidade de Causa (PC) 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. Na

prática, o valor PC mede a correlação estatística entre o aparecimento de uma morbidade e a exposição à radiação ionizante anterior.

Matematicamente, o BEIR V determina a PC em função do valor do ERR, segundo a função:

$$PC = \frac{ERR(D,t,e,s)}{1 + ERR(D,t,e,s)} \quad (13)$$

3.4 AÇÕES ASSIMÉTRICAS

Um cenário em que prevalecem ações assimétricas (ou guerra de 4ª geração ou não convencional) foi levado em consideração nesta pesquisa, simulando a deflagração de um RDD. O conceito de ações assimétricas atribui uma nova expressão às ações que empregam métodos de conflito não lineares e, em grande parte dos casos, com técnicas simples, porém com ênfase em nível psicológico, estratégico e com apelos ideológicos (SPENCER, LIGHTFOOT, 2001). Três fatores são fundamentais para se lidar com ações assimétricas: (a) detectar, (b) deter e (c) defender (NANCE, 2008).

A IAEA criou, em 1995, o *Incident and Trafficking Database System* (ou Sistema ITDB) (IAEA, 2014) para registrar e analisar os incidentes de tráfico ilícito de material radioativo, nuclear e outros. O sistema incorpora todos os incidentes em que o material radioativo ou nuclear está fora de controle regulatório. O Sistema ITDB recebe informações sobre incidentes que vão desde a posse ilegal até a tentativa de venda e contrabando de material radioativo, além da investigação e descoberta de fontes radioativas perdidas. Em geral, abrange a investigação de todos os artefatos que possam direta ou indiretamente conter materiais radioativos, inclusive sucatas. Além disso, os países participantes também são encorajados a relatar incidentes envolvendo materiais radioativos de qualquer espécie, utilizando um meio eletrônico denominado como Pontos de Contato nacionais como ferramenta de comunicação entre si (IAEA, 2014).

3.4.1 DISPOSITIVO DE DISPERSÃO RADIOLÓGICA (RDD)

Considera-se um RDD o artefato cuja natureza combina material radioativo com explosivos convencionais, também conhecido como “bomba suja” (*dirty bomb*), exemplificado na figura 3.1. As consequências físicas causadas por esses tipos de dispositivos são proporcionais ao material radioativo utilizado e, também, à potência, local e tipo de explosivo empregado, sendo normalmente o trinitrotolueno (TNT) o mais utilizado (STEINMEYER, 2004).

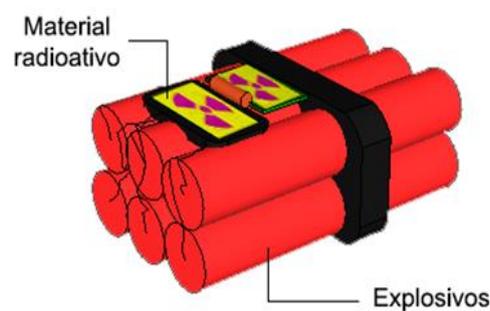


FIG. 3.1 Esquema de uma bomba suja (RDD).

Entre os danos que um RDD pode causar, podem ser citados como principais: (a) trauma mecânico; (b) exposição à radiação ionizante; (c) contaminação radiológica interna e/ou externa; (d) elevado número de pessoas potencialmente afetadas; (e) impactos psicológicos e alteração da rotina social; (f) queimaduras e até mesmo morte imediata por efeito mecânico da explosão (HOMANN, 2013).

As políticas econômicas vigentes ainda não consideram este tipo de incidente, que gera grande número de indivíduos afetados, uma vez que é um meio de contaminação em massa, tanto interna (inalação e ingestão), quanto externa. O número de enfermos de um RDD pode ser elevado em curto prazo, gerando graves danos ao Sistema de Saúde (ZIMMERMAN, LOEB, 2004).

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 METODOLOGIA

Este trabalho é dirigido à investigação e simulação das consequências oriundas de um cenário radiológico produzido por um RDD. Inicialmente definiu-se um local como ponto de deflagração, para o qual informações sobre condições climáticas e população local foram coletadas da base de dados proveniente de órgãos oficiais (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE). Os dados da montagem do RDD (elemento radioativo utilizado, tipo e quantidade de explosivos) além da situação do terreno e condições climáticas foram criados como dados de entrada do HotSpot. Após o levantamento dos dados necessários, estes foram inseridos no código HotSpot, que gerou as plumas de isodoses sobre o terreno.

Apenas situações estáticas são consideradas pelo código, que calcula o cenário no período de observação de 10 minutos seguintes à deflagração do RDD e faz previsões considerando apenas a velocidade do vento como fator de arraste, sem considerar efeitos de contaminação em reservatórios de água.

Os valores da TED obtidos como resposta do HotSpot indicam a dose no contorno das plumas. Esses valores foram inseridos nas equações do BEIR V, apresentadas na tabela 3.1, e separadas por gênero, faixa etária e período de latência, a fim de se obterem estimativas de ERR para cada situação.

Representando percentuais que se referem aos acréscimos à linha de base nacional (Brasil) para leucemia, os valores de ERR estimam o número de novos casos esperados. Uma função que busca contabilizar o excesso de custo estimado para tratamentos foi sugerida, de forma a considerar o custo de otimização regularizado pela CNEN em caso de incidentes radiológicos regulados por ela, custos de tratamento e custo logístico.

Denominou-se Excesso de Custo (EC) o somatório dos custos estimados para as diversas faixas etárias e gênero. Como forma de comparação, o produto do número de novos casos esperados pelo INCA para leucemia pelo valor que o SUS atribui para

tratamento desta morbidade, fornece um dado aqui chamado de *custo pela linha de base* (C_{LB}), onde, a partir de seu cálculo e do valor estimado para EC, é possível analisar a proporção entre ambos.

Um incidente radiológico pode gerar impactos financeiros em grande escala, envolvendo gastos na área de saúde, como medicamentos e internações, custos de limpeza e descontaminação, perdas e danos de edifícios e construções, custos de evacuação, gastos de transportes e residências provisórias para habitantes da região, entre outros (REICHMUTH et al., 2005).

Restringindo-se ao cenário proposto, apenas impactos financeiros relacionados aos habitantes que apresentam riscos de leucemia foram estimados, tudo a partir de dados do SUS e equações do BEIR V.

Uma função que envolva os custos pré-definidos por normas e valores de casos novos (CN) torna-se necessária. Tal função de excesso de custo foi proposta a seguir, considerando o número de casos novos devido à exposição à radiação ionizante por ocasião do cenário RDD:

$$EC = (C_i \cdot TED + C_T + C_L) \cdot CN \quad (14)$$

onde:

EC = Excesso de custo estimado em reais.

C_i = custo inicial, estipulado pela norma CNEN NN-3.01, que estima que em 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 \$10.000/pessoa.Sv. Em reais, o valor torna-se em torno de R\$ 27.087,00 em 05 de Janeiro de 2015.

TED = dose total efetiva no indivíduo exposto, em sieverts.

C_T = custo de tratamento, em reais

C_L = custos logísticos, em reais.

CN = casos novos acima da linha de base, faz referências aos ERR calculados a partir de equações do BEIR V.

4.2 O CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO

A deflagração de um RDD foi simulada na região do Parque dos Atletas, situado no município Rio de Janeiro, na Avenida Salvador Allende, 6500 – Camorim, Rio de Janeiro, RJ (22° 58' 48.78" (S); 43° 24' 29.02" (O)). Com um terreno de 150 mil m² de área, o Parque dos Atletas tem condições de abrigar diversas modalidades de esportes, destinando-se ainda a eventos de grande porte. Recebeu em 2013 o título de *Cidade do Rock*, sendo o local escolhido para abrigar o evento *Rock in Rio*.

O local foi escolhido por se encontrar na confluência de três bairros (Barra da Tijuca, Camorim e Jacarepaguá), o que tem influência sobre os parâmetros estatísticos, devido à variação de fluxo populacional na região. A área também abriga o Centro de Convenções do Rio, também conhecido como Riocentro. Em particular, o Riocentro possui grande importância, pois sedia grandes eventos contando com elevado número de participantes. A XVI Bienal do Livro realizada no Riocentro, por exemplo, obteve público estimado de 660 mil pessoas durante os seus 11 dias de evento em 2011. A figura 4.1 indica a localização do Parque dos Atletas.



FIG. 4.1 Localização do Parque dos Atletas e do Riocentro (Fonte: Google Earth®).

4.3 ANÁLISE DO EVENTO

A fim de se chegar a uma metodologia para enfrentamento da situação e uma estimativa de impacto financeiro considerando o tratamento de leucemia, alguns passos são sugeridos de forma a simplificar a filtragem de dados no momento de crise, facilitando a fase inicial da resposta.

Foi elaborada uma Análise de Evento Radiológico (Apêndice 8.1), com a finalidade de se ter uma especificação rápida do evento ocorrido. Tem-se como exemplo para o cenário em estudo as tabelas 4.1 a 4.4, apresentadas a seguir.

TAB. 4.1 Composição do cenário modelado.

TAB. 4.2 Composição do cenário modelado (cont. TAB. 4.1).

ANÁLISE DE EVENTO RADIOLÓGICO

(A) ESTUDO DA SITUAÇÃO

1. Descrição do evento: Provável ação assimétrica envolvendo a utilização de RDD, com pequena quantidade de explosivos e material radioativo solúvel em água.

2. Local do incidente: Parque Atletas: Av. Salvador Allende, 6500 – Camorim, Rio de Janeiro – RJ, 22780-160.

3. Coordenadas geográficas: 22° 58' 48.78" (S);
43° 24' 29.02" (O).

4. Horário aproximado da deflagração: 00:00 h.

5. Possibilidade de eventos externos no local:

Não Sim

a. Quantidade de possíveis eventos externos: Não

b. Local de cada evento: --

c. Coordenadas geográficas de cada local: --

d. Número de pessoas em cada local: --

e. Total de público externo: --

(B) DADOS DE ENTRADA: HOTSPOT

1. Modelo de dispersão atmosférica:

Explosão com Plutônio Ressuspensão com Trítio

Incêndio com Plutônio Explosão Geral

Ressuspensão com Plutônio Incêndio Geral

Explosão com Urânio Ressuspensão Geral

Incêndio com Urânio Pluma Geral

2. Radionuclídeo: Césio-137

3. Meia-vida: 30 anos.

4. Atividade da fonte: 3,70 E+14 Bq

5. Quantidade de explosivo: 10 lb de TNT (aprox. 4,5 kg)

6. Velocidade do vento: 3,0 m/s

7. Classe de estabilidade:

A B C D E F

8. Direção do vento (graus): 130°

9. Altura média dos receptores: 1,70 m

10. Fatores de conversão de dose:

FGR-11 FGR-13

Coeficientes para Conversão de Dose Aguda

11. Terreno:

Básico Cidade

12. Tempo de exposição:

a. Início: 00:00 h.

b. Duração: 24:00 h.

13. Valores TED para contorno das plumas:

a. Pluma interna: 100 mSv

b. Pluma mediana: 50 mSv

c. Pluma externa: 1 mSv

TAB. 4.3 Composição do cenário modelado (cont. TAB. 4.2).

(C) DEMOGRAFIA LOCAL	
1.	Densidade demográfica: aprox. 5.265,81 hab/km ²
2.	Área da pluma externa: 778,0 km ²
3.	Número aproximado de habitantes afetados: 4,10 E+6 habitantes
4.	Habitantes + Público externo: 4,16 E+6 pessoas

TAB. 4.4 Composição do cenário modelado (cont. TAB. 4.3).

(D) EQUAÇÃO BEIR V	
1.	Morbidade: Leucemia
2.	Equação BEIR V: <i>(remodelada pelo TECDOC - 870 - IAEA)</i>
<u>Gênero Masculino</u>	
	$ERR(D, t, e, s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,33(D+0,79D^2)\exp[-0,17(t-25)]$ para $e < 20$
	$ERR(D, t, e, s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,48(D+0,79D^2)\exp[-0,13(t-25)]$ para $20 \leq e < 40$
	$ERR(D, t, e, s) = F(D)\beta(t,e,s) = 1,31(D+0,79D^2)\exp[-0,07(t-25)]$ para $e \geq 40$
<u>Gênero Feminino</u>	
	$ERR(D, t, e, s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,66(D+0,79D^2)\exp[-0,07(t-25)]$ para $e < 20$
	$ERR(D, t, e, s) = F(D)\beta(t,e,s) = 0,97(D+0,79D^2)\exp[-0,03(t-25)]$ para $20 \leq e < 40$
	$ERR(D, t, e, s) = F(D)\beta(t,e,s) = 2,64(D+0,79D^2)\exp[0,03(t-25)]$ para $e \geq 40$

Com estes dados, uma equipe de respondedores pode ter uma rápida fonte de dados para uma avaliação inicial da situação, sempre com valores superestimados, proporcionando uma condição de segurança das ações a serem conduzidas.

(A) ESTUDO DA SITUAÇÃO:

1. Descrição do evento: Breve descrição do cenário RDD.
2. Local do incidente: ver item 4.2.
3. Coordenadas geográficas: Necessárias para obtenção das plumas de isodoses sobrepostas ao local.
4. Horário aproximado da deflagração: Utilizou-se o horário de 00:00 h por conveniência.
5. Possibilidade de eventos externos no local: Necessário para averiguação do público externo que deve ser somado à população local.
 - a. Quantidade de possíveis eventos externos: Estima o público dentro de áreas delimitadas pelas plumas.
 - b. Local de cada evento: Endereço de eventos externos que estejam dentro da área delimitada pelas plumas.
 - c. Coordenadas geográficas de cada local: idem ao item 3.
 - d. Número de pessoas em cada local: Estimativa de público não habitante ao redor, dentro da área contaminada.
 - e. Total de público externo: Somatório de pessoas não habitantes e habitantes da região em eventos considerados dentro das plumas.

(B) DADOS DE ENTRADA: HOTSPOT

1. Modelo de dispersão atmosférica: O modelo Explosão Geral foi utilizado, pois considera TNT como explosivo e materiais radioativos, simulando um RDD.
2. Radionuclídeo: Informar o radionuclídeo a ser utilizado. No caso foi utilizado o ^{137}Cs , por ser tratar de uns dos elementos radioativos em evidência para ações assimétricas (IAEA, 1996).
3. Meia-vida: Fornecer a meia-vida do radionuclídeo em questão. O HotSpot fornece a meia-vida de diversos radionuclídeos em sua biblioteca.

4. Atividade da fonte: Utilizar como referência o valor da atividade da fonte no momento da sua utilização no RDD. O valor de $3,70E+14$ Bq (10 kCi) para o ^{137}Cs pode ser encontrado em irradiadores industriais (YVES, 2014).
5. Quantidade de explosivo: Massa de explosivo utilizado no RDD. Foram consideradas 10 lb de TNT (aproximadamente 4,5 kg), por se tratar de uma pequena massa e não chamar a atenção de autoridades.
6. Velocidade do vento: O HotSpot classifica a velocidade do vento conforme mostrado na tabela 4.5.

TAB. 4.5 Apresentação das características dos ventos, segundo o HotSpot (HOMANN, 2013).

Classificação	Caraterísticas observáveis	Velocidade em m/s
Calmo	Fumaça sobe verticalmente	< 0,5
Ar suave	Fumaça deriva para baixo	0,5 – 1
Brisa leve	Possível sentir a brisa no rosto; folhas farfalham.	1 – 3
Brisa suave	Galhos/folhas de árvores em constante movimento	3 – 5
Brisa moderada	Levanta poeira e solta papéis	5 – 8
Brisa fresca	Pequenas árvores começam a balançar	8 – 11
Brisa forte	Grandes galhos de árvore em movimento	11 – 14
Vento moderado	Árvores inteiras em movimento	14 – 17
Vento fresco	Galhos rompem; andar impedido	17 – 21
Vento forte	Ocorrem ligeiros danos estruturais	21 – 24
Vendaval	Árvores são arrancadas; grandes danos estruturais	24 – 28
Tempestade	Muito raro; destruição generalizada	28 – 34
Furacão		> 34

O local da deflagração possui velocidade do vento variável entre 0,0 e 5,0 m/s (CORREA, 2004). Desta forma, optou-se por utilizar um valor médio para a velocidade do vento, que no caso foi de 3,0 m/s, utilizado como fator de arraste responsável pela dispersão do material radioativo.

7. Classe de estabilidade: As classes são determinadas de A a F e variam de acordo com o dia (baixa ou alta insolação) ou noite. O HotSpot enquadra automaticamente a classe de instabilidade do cenário, que também pode ser escolhida de forma manual. A tabela 4.6 mostra a seleção do HotSpot em cada classe de instabilidade.

TAB. 4.6 Condições meteorológicas para a definição da estabilidade atmosférica, separadas de A a F, segundo o HotSpot (HOMANN, 2013).

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

Sendo A: extremamente instável, B: moderadamente instável, C: ligeiramente instável, D: neutro, E: ligeiramente estável e F: moderadamente estável. O HotSpot selecionou o cenário automaticamente na classe E, sendo a segunda pior situação.

8. Direção do vento (graus): Determina a direção em que o vento se propaga. O valor da direção do vento no local oscila entre 90° e 135° (CORREA, 2004), com isso o valor de 130° foi aceito por estar na direção do Riocentro.

9. Altura média dos receptores: Trata-se da altura média da população. O IBGE determina altura média de 1,70 m para a população brasileira (IBGE, 2010).

10. Fatores de conversão de dose: São bibliotecas divididas de acordo com as ICRP 26/30, ICRP 60/66 e também com doses agudas para efeitos determinísticos (Coeficientes para Conversão de Dose Aguda). Para o cenário, foi escolhido a FGR-13, a qual se refere à ICRP 60/66. A tabela 4.7 mostra as principais diferenças entre a ICRP 26/30 e ICRP 60/66.

TAB. 4.7 Principais diferenças estabelecidas entre a ICRP 26/30 e a ICRP 60/66.

ICRP 26/30 (Opção FGR-11 do HotSpot)	ICRP 60/66 (Opção FGR-13 do HotSpot)
Equivalente de Dose Efetiva Comprometida	Dose Efetiva Comprometida
Equivalente de Dose Comprometida	Dose Comprometida Equivalente
Equivalente de Dose Efetiva Cumulativa Total	Dose Efetiva Cumulativa Total
Equivalente de Dose	Dose Equivalente
Equivalente de Dose Efetiva	Dose Efetiva
Fator de Qualidade	Fator de Ponderação da Radiação
Fator de Ponderação	Fator de Ponderação do Tecido
Equivalente de Dose Total Efetiva	Dose Total Efetiva

11. Terreno: Divide-se em Básico, onde não utiliza objetos que podem servir de blindagem ou atenuantes da radiação, como prédios, casas e árvores, e Cidade, onde estruturas que não eram consideráveis no terreno Básico são relevantes neste. Para o cenário em análise foi considerado o terreno Básico, pois gera plumas de isodoses em sua totalidade, proporcionando um pior cenário, pois possíveis blindagens não foram levadas em consideração.

12. Tempo de exposição: Intervalo de tempo que indivíduos serão expostos à radiação. Para o cenário considerou-se uma exposição de 24h.

13. Valores TED para contorno das plumas: Para este cenário, os valores TED foram atribuídos de acordo com os limites de dose para indivíduos do público, dose para evacuação da área e dose para situações de emergência. Em geral, esses valores são representados pela EPA (tabela 4.8), contudo, no Brasil, eles são propostos na norma CNEN NN-3.01 Posição Regulatória 3.01/006 (2011), mostrados na tabela 4.9.

TAB. 4.8 Ações de proteção, doses de referência e legislação pertinente para as fases de resposta (EPA, 2013).

Fase	Ação de proteção	Doses de referência	Legislação
Inicial	Limiar de emergência para exposição de trabalhadores	50 mSv (ou superior em circunstâncias excepcionais ^a)	PAG Manual ^e
	Abrigagem	10 a 50 mSv ^b	PAG Manual ^e
	Evacuação	10 a 50 mSv ^c	PAG Manual ^e
	Administração de drogas profiláticas	Para iodeto de potássio, valores da FDA Guidance ^d	FDA Guidance (FDA, 2001)
Intermediária	Limiar para exposição de trabalhadores ^e	50 mSv/ano	PAG Manual ^e
	Relocação do público geral	20 mSv, projetados na dose do primeiro ano. Anos subsequentes: 5 mSv/ano.	PAG Manual ^e
Final	Interdição de alimentos	5 mSv/ano	FDA Guidance (FDA, 1998)
	Interdição da água	5 mSv/ano	PAG Manual ^e
	Ações finais de limpeza	Baseada na otimização PAG	

[a] Em casos em que o controle da quantidade de radiação não está avaliável ou, devido à magnitude do incidente, não são suficientes, doses acima de 50 mSv podem ser inevitáveis.

[b] Normalmente deverá iniciar em 10 mSv, entretanto, a abrigagem pode começar em níveis mais baixos, se vantajosa.

[c] Normalmente deverá iniciar em 10 mSv.

[d] Oferece proteção apenas para o iodo radioativo.

[e] (EPA, 2013).

TAB. 4.9 Limites de doses definidos pela norma CNEN NN-3.01 Posição Regulatória 3.01/006.

Grandeza	Órgão	IOE	Indivíduo do público
Dose efetiva (anual ^[a])	Corpo inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
Dose equivalente (anual ^[a])	Cristalino	20 mSv ^[b]	15 mSv
	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---
	Abrigagem		10 mSv ^{[e] [f]}
	Evacuação		50 mSv ^{[e] [g]}
	Emergência		< 100 mSv ^{[h] [i]}

[a] Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[c] Em circunstâncias especiais, a CNEN pode autorizar doses efetivas de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

[e] Valores oriundos da posição regulatória CNEN 3.01/006:2011.

[f] A abrigagem não é recomendada por um período superior a 2 (dois) dias.

[g] A evacuação não é recomendada por um período superior a 1 (uma) semana.

[h] Somente voluntários podem empreender ações nas quais a dose efetiva possa exceder 50 mSv. Nesses casos, esses voluntários devem ser informados, com antecedência, dos riscos associados à saúde, e devem ser treinados para as ações que possam ser necessárias.

[i] Em ações para salvar vidas, o valor de 100 mSv pode ser ultrapassado por voluntários, desde que observados os limiares para efeitos determinísticos.

Inicialmente, os dados do quadro B da Análise de Evento Radiológico (tabela 4.2) devem ser inseridos no HotSpot. O programa oferece outros dados a serem modificados, tendo sido utilizados os valores *default* do programa.

(C) DEMOGRAFIA LOCAL:

1. Densidade demográfica: Quantidade de habitantes por quilômetro quadrado. Foi considerada homogênea e referente ao município do Rio de Janeiro no valor de 5.265,81 hab/km² (IBGE, 2010).

2. Área da pluma externa: Refere-se à toda área atingida. O valor da área é estimado

pelo HotSpot, considerando estimativas conservativas.

3. Número aproximado de habitantes afetados: Produto entre a densidade demográfica e a área da pluma externa.

4. Habitantes + Público externo: Somatório do número de habitantes com o número de pessoas estimado em cada evento externo, se houver.

(D) EQUAÇÃO BEIR V:

1. Morbidade: Leucemia.

2. Equação BEIR V: Inserir as funções propostas pelo BEIR V, especificando faixas etárias, períodos de latência, gênero dos indivíduos e constantes das equações. Neste cenário, foram utilizadas definições propostas pelo TECDOC-870 da IAEA, apresentadas na tabela 4.4.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DADOS DE SAÍDA DO HOTSPOT

Após os dados da tabela 4.2 serem inseridos no HotSpot, o código gera como resposta os valores de TED para indivíduos expostos à radiação ionizante, assim como a dose efetiva em determinados órgãos-alvo, as plumas de isodoses e o gráfico da TED em função da distância. As figuras 5.1 e 5.2 demonstram as plumas de isodoses em planos cartesianos, em escala de 200 km e 5 km, respectivamente.

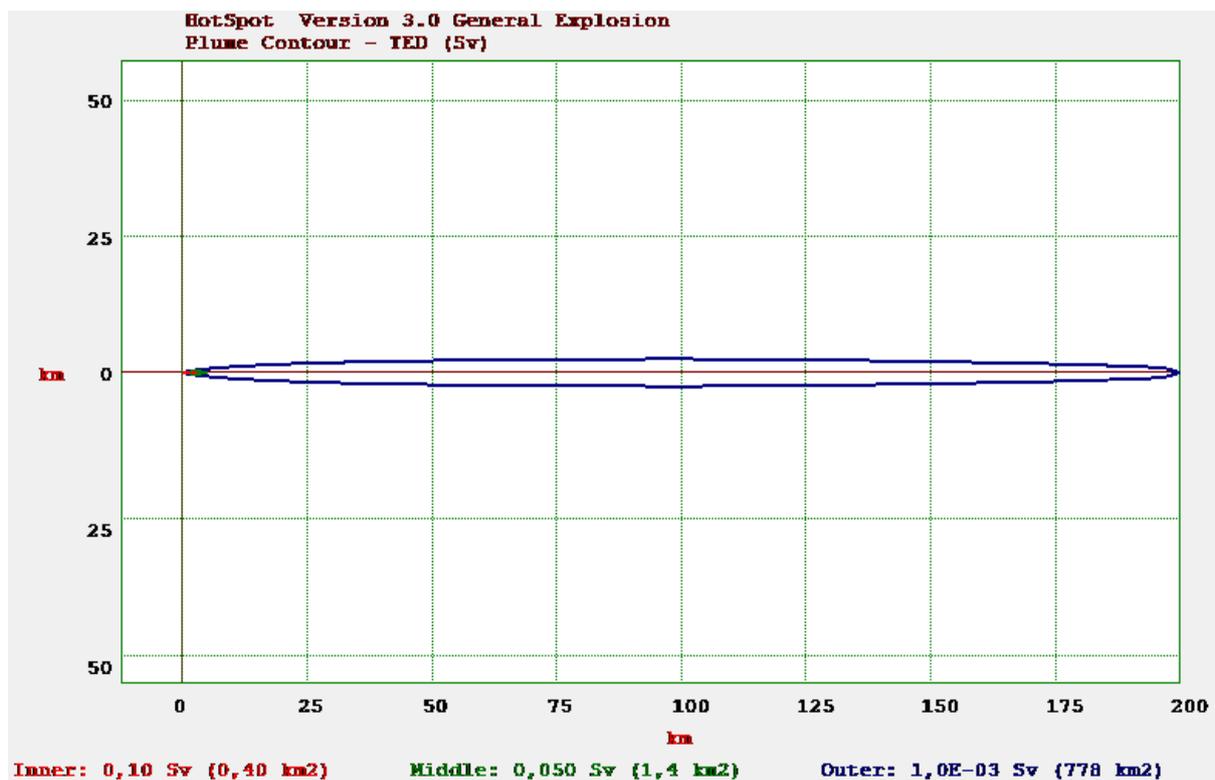


FIG. 5.1 Pluma de contaminação em escala de 200 km.

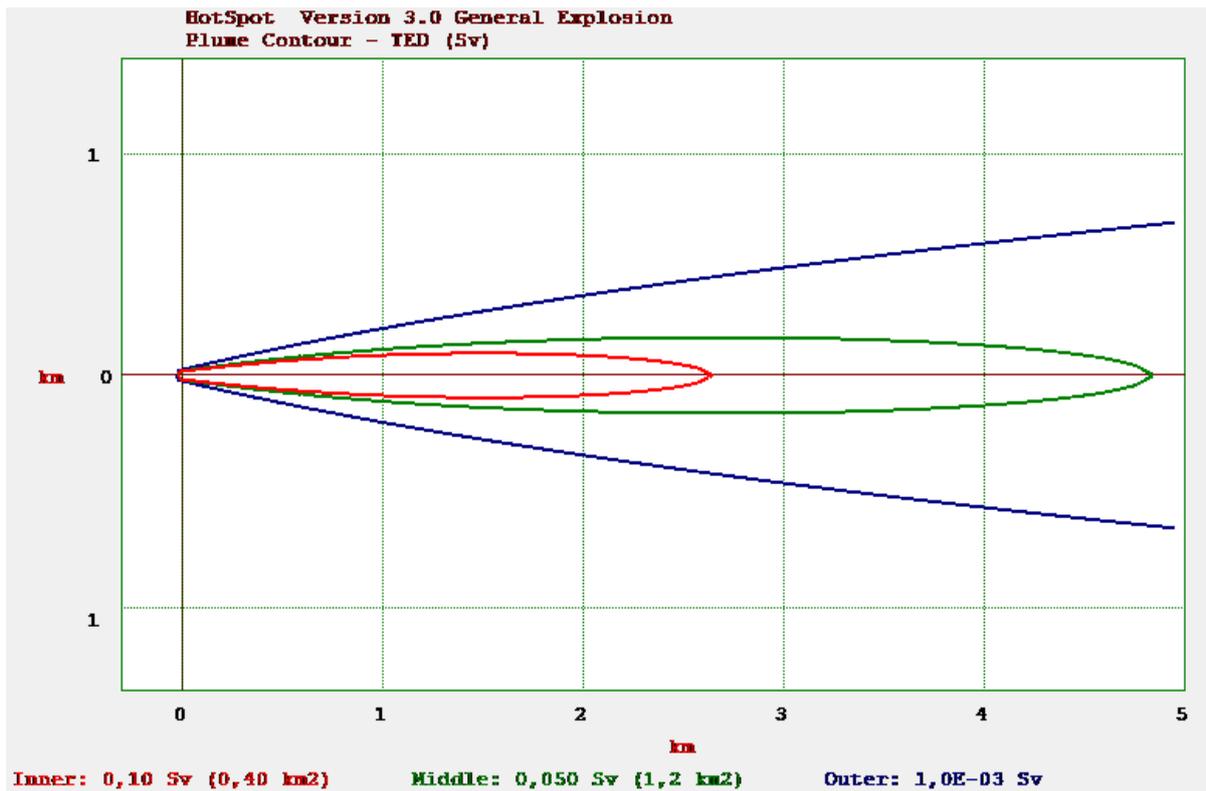


FIG. 5.2 Pluma de contaminação em escala de 5 km.

A pluma interna (contorno vermelho) representa uma TED igual a 100 mSv, a pluma mediana (contorno verde) demonstra a TED de 50 mSv e a pluma externa (contorno azul), exibe a isodose para 1 mSv, no período de 24 h estabelecida no cenário. Esses valores demonstram as áreas em que só poderiam entrar profissionais voluntários (100 mSv), a área até onde seria necessária a evacuação (50 mSv) e a região que seria o limite para exposição de indivíduos do público (1 mSv) (ver tabela 4.9). A figura 5.3 mostra a angulação de 130°, local onde se encontra o Riocentro, em relação ao Parque dos Atletas.

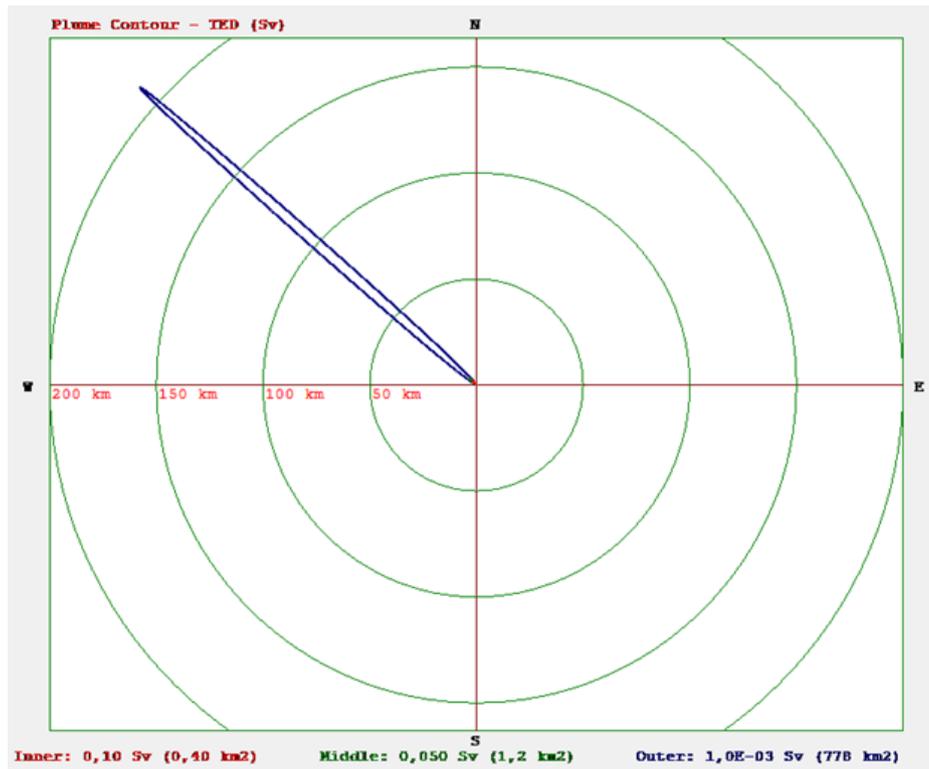


FIG. 5.3 Pluma de contaminação em escala de 200 km de raio e na direção 130°.

A figura 5.4 foi gerada pelo HotSpot e descreve a curva da TED em função do aumento da distância do local de deflagração.



FIG. 5.4 Dose em função da distância da linha central.

5.2 ANÁLISE DEMOGRÁFICA

Objetivando a realização de um levantamento sobre o impacto financeiro causado pelo RDD com relação à leucemia apenas, torna-se necessária a divisão mais detalhada sobre gêneros e faixas etárias da população no local do evento, com a finalidade de se obter um estudo sobre impacto por classes. A figura 5.5 mostra a pirâmide etária do município do Rio de Janeiro em função do gênero.

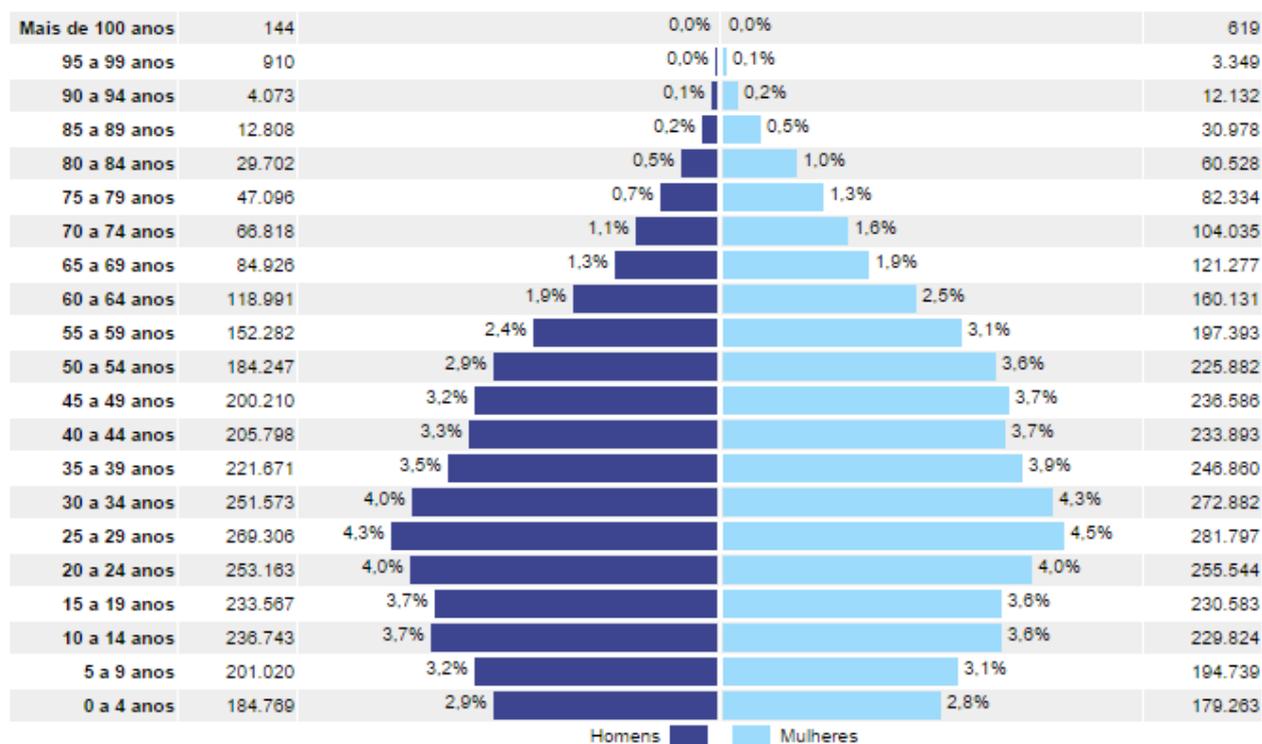


FIG. 5.5 Distribuição da população por gênero, segundo os grupos de idade no município do Rio de Janeiro (IBGE, 2010).

A tabela 5.1 foi criada para separar percentualmente as faixas etárias de acordo com dados do Censo 2010.

TAB. 5.1 Valores da densidade demográfica do município Rio de Janeiro, segundo o Censo 2010, divisão por faixa etária e gênero.

Dados demográficos	
Densidade demográfica:	Rio de Janeiro 5.265,81 hab/km²
Gênero Masculino (46,90% da população)	e < 20: 13,50%
	20 ≤ e < 40: 15,80%
	e ≥ 40: 17,60%
Gênero Feminino (53,10% da população)	e < 20: 13,10%
	20 ≤ e < 40: 16,70%
	e ≥ 40: 23,30%

Contudo, torna-se necessária a estimativa do número aproximado de pessoas na região das plumas, calculado como o produto entre a densidade demográfica local e a área contaminada, fornecida pelo HotSpot. A tabela 5.2 mostra esses dados.

TAB. 5.2 Áreas atingidas e número aproximado de habitantes.

PLUMAS:	INTERNA	MEDIANA	EXTERNA
Dose (Sv):	0,100	0,050	0,001
Área atingida (km ²):	0,400	1,400	778,000
Número médio de habitantes:	2.106	7.372	4.096.800
Total de habitantes com e < 20:	560	1.961	1.089.749
Total de habitantes com 20 ≤ e < 40:	685	2.396	1.331.460
Total de habitantes com e ≥ 40:	861	3.015	1.675.591

5.3 ERR E PC

Os valores de ERR e PC, relativos à ocorrência de leucemia, foram calculados para o gênero masculino e para o feminino de acordo com as divisões sugeridas pelo TECDOC-870 para cada uma das três plumas propostas, utilizando-se a latência de 2,5 anos (KATO, SHIMIZU 1992; PRESTON *et al* 1994; PRESTON *et al* 2004). As tabelas 5.3 a 5.5 descrevem os valores de ERR e PC para as plumas de isodoses.

TAB. 5.3 Valor de ERR e PC para exposição na pluma interna.

PLUMA INTERNA					
Gênero	Idade (anos)	Latência (anos)	Dose (Sv)	ERR	PC
Masculino	e < 20	2,5	0,100	1,632	62,01%
	20 ≤ e < 40	2,5	0,100	0,965	49,11%
	e ≥ 40	2,5	0,100	0,683	40,58%
Feminino	e < 20	2,5	0,100	0,344	25,60%
	20 ≤ e < 40	2,5	0,100	0,206	17,05%
	e ≥ 40	2,5	0,100	0,145	12,67%

TAB. 5.4 Valor de ERR e PC para exposição na pluma mediana.

PLUMA MEDIANA					
Gênero	Idade (anos)	Latência (anos)	Dose (Sv)	ERR	PC
Masculino	e < 20	2,5	0,050	0,786	44,01%
	20 ≤ e < 40	2,5	0,050	0,465	31,74%
	e ≥ 40	2,5	0,050	0,329	24,75%
Feminino	e < 20	2,5	0,050	0,166	14,22%
	20 ≤ e < 40	2,5	0,050	0,099	9,01%
	e ≥ 40	2,5	0,050	0,070	6,53%

TAB. 5.5 Valor de ERR e PC para exposição na pluma externa.

PLUMA EXTERNA					
Gênero	Idade (anos)	Latência (anos)	Dose (Sv)	ERR	PC
Masculino	e < 20	2,5	0,001	0,015	1,49%
	20 ≤ e < 40	2,5	0,001	0,009	0,89%
	e ≥ 40	2,5	0,001	0,006	0,63%
Feminino	e < 20	2,5	0,001	0,003	0,32%
	20 ≤ e < 40	2,5	0,001	0,002	0,19%
	e ≥ 40	2,5	0,001	0,001	0,13%

As figuras 5.6 e 5.7 mostram a relação do PC em função do ERR para o gênero masculino e para o feminino, respectivamente.

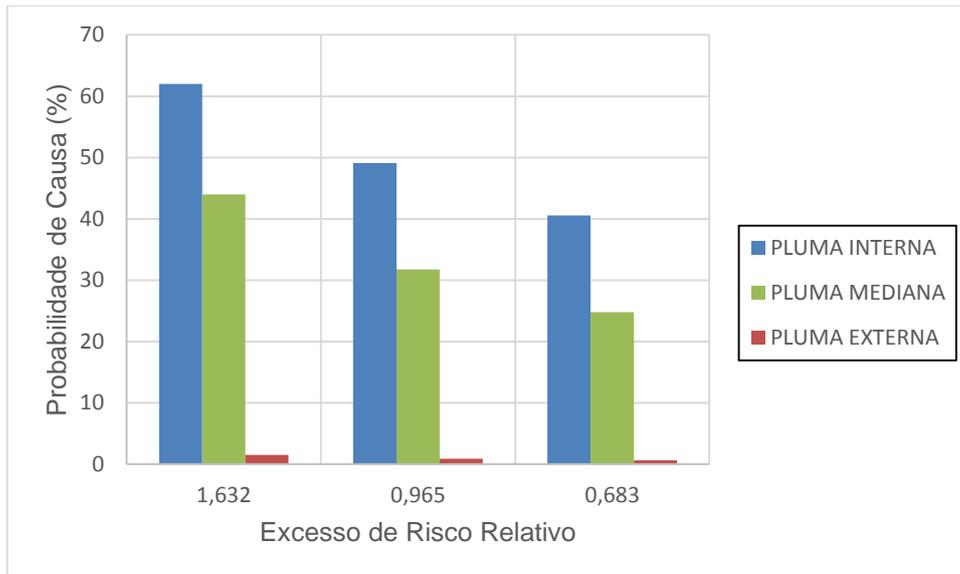


FIG. 5.6 PC em função do ERR nas três plumas de isodoses (Masculino).

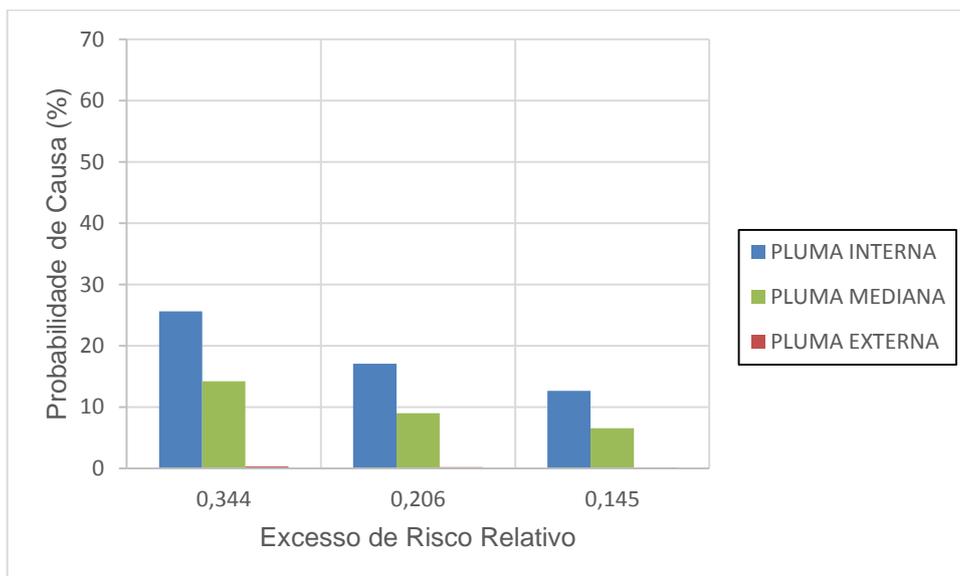


FIG. 5.7 PC em função do ERR nas três plumas de isodoses (Feminino).

5.4 IMPACTO FINANCEIRO

Em relação à função de excesso de custo (equação 14) o valor do custo inicial (C_i) é fixo e estabelecido pela CNEN, enquanto os valores do custo de tratamento (C_T) e custos logísticos (C_L) são variáveis. Esses valores possuem alta complexidade de

avaliação, pois dependem de diversos fatores externos não estudados aqui neste trabalho, como transporte, alimentação e medicação.

Para o valor de C_T , tem-se a dependência de situações, como o tipo e a severidade da morbidade desenvolvida, que varia, principalmente, em função da TED. No Brasil, o SUS prevê o valor de R\$ 375,00 por sessão de tratamento pelo método de TBI, utilizado como pré-transplante de medula óssea, além do valor gasto pelo próprio transplante, que varia com o tipo de leucemia adquirida (SBR, 2010). Em crianças são necessárias, em média, seis sessões com aplicação de 2 Gy, podendo ser maior o número de sessões em adultos (GORDON et al., 1997). Para este trabalho, somente o tratamento por TBI com média de seis sessões foi considerado, totalizando R\$ 2.250,00 por paciente, sendo o valor de C_T para este trabalho.

O valor de C_L trata de custos logísticos em geral, considerando gastos de internação, transporte, alimentação, procedimentos médicos e hospitalares, sendo um custo estimado para atendimentos, e não para resposta ao evento. O valor de C_L foi admitido nulo para este trabalho e seu cálculo deve ser abordado em um estudo especialmente desenhado para este fim.

É sugerido o planejamento de funções específicas para C_T e C_L , devido às diversas variáveis intrínsecas a esses termos (medicamentos, transportes, alimentação, entre outros), além da necessidade de considerar vítimas em geral, e não apenas indivíduos com leucemia.

Em relação ao valor de CN, este foi estimado de maneira a considerar a população local e os valores de ERR. Primeiramente, o número total de habitantes da região onde ocorreu a deflagração do RDD, no caso, o município do Rio de Janeiro, deve ser conhecido. A partir do cenário modelado, estima-se um valor próximo de 4.096.800 habitantes na região, onde 46,90% são do gênero masculino e 53,10% do gênero feminino, segundo o Censo 2010, somando assim 1.921.400 homens e 2.175.400 mulheres, aproximadamente. Contudo, o INCA estima a taxa bruta de 5,96 e 5,94 casos de leucemia por 100 mil habitantes, para o gênero masculino e para o feminino, respectivamente, totalizando 180 novos casos para homens e 210 para mulheres (INCA, 2014). Esses valores foram multiplicados por cada faixa de ERR, onde se pode calcular o número de CN em cada faixa etária. A tabela 5.6 mostra o cálculo que projeta o número de casos novos de acordo com o ERR.

TAB. 5.6 Número de casos novos a partir do ERR.

Plumas	Gênero	Idade	ERR	CN
Interna	Masculino	$e < 20$	1,632	293,754
		$20 \leq e < 40$	0,965	173,719
		$e \geq 40$	0,683	122,908
	Feminino	$e < 20$	0,344	72,243
		$20 \leq e < 40$	0,206	43,168
		$e \geq 40$	0,145	30,458
Mediana	Masculino	$e < 20$	0,786	141,500
		$20 \leq e < 40$	0,465	83,680
		$e \geq 40$	0,329	59,204
	Feminino	$e < 20$	0,166	34,799
		$20 \leq e < 40$	0,099	20,794
		$e \geq 40$	0,070	14,671
Externa	Masculino	$e < 20$	0,015	2,725
		$20 \leq e < 40$	0,009	1,611
		$e \geq 40$	0,006	1,140
	Feminino	$e < 20$	0,003	0,670
		$20 \leq e < 40$	0,002	0,400
		$e \geq 40$	0,001	0,282

A partir da tabela 5.6, estima-se 880 casos acima da média para o gênero masculino e 217 para o feminino, aproximadamente. A figura 5.8 mostra como o valor de CN varia em função da TED.

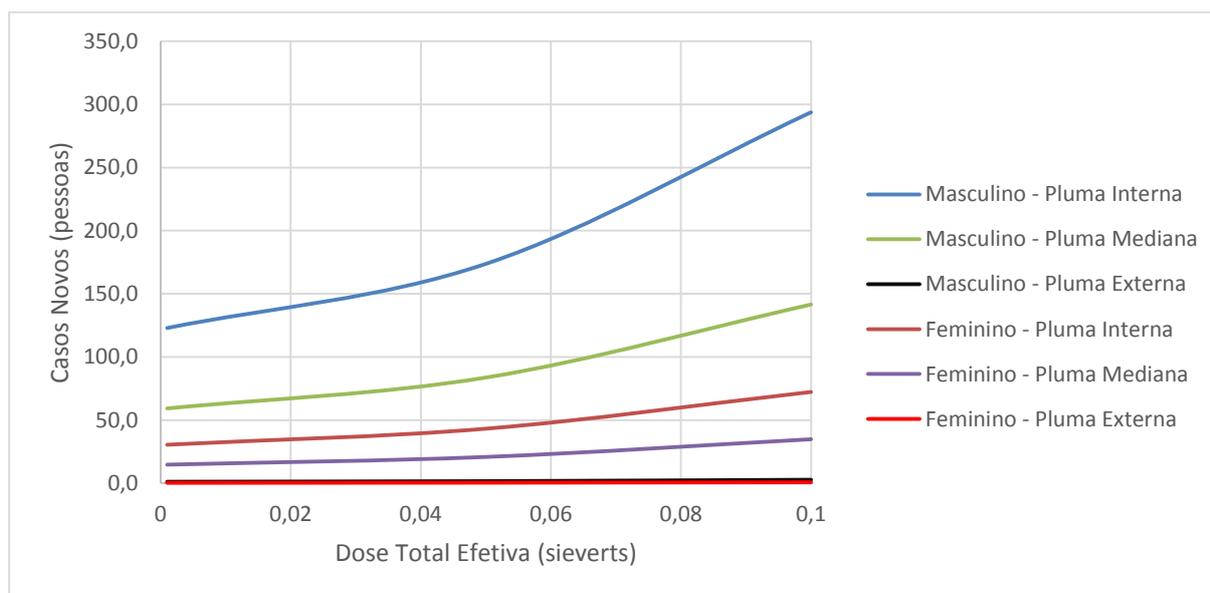


FIG. 5.8 Número de CN em função da TED.

Como é possível analisar a partir da tabela 5.6, o número de indivíduos do gênero masculino que podem apresentar leucemia é maior que o do gênero feminino. Esse resultado consiste no fato que, o número de sobreviventes do gênero masculino dos bombardeios atômicos no Japão que apresentaram leucemia foi maior que o do gênero feminino (OSAZA et al., 2012) e como os modelos do BEIR V são apresentados a partir desses sobreviventes, o excesso de risco relativo também apresenta maior valor no trabalho.

A partir da função de EC e dos valores de ERR já calculados, os coeficientes monetários foram estimados e são apresentados na tabela 5.7.

TAB. 5.7 Valores estimados a partir do número de casos novos.

Pluma	Gênero	Idade	Valor
Interna	Masculino	$e < 20$	R\$ 1.456.639,62
		$20 \leq e < 40$	R\$ 861.418,87
		$e \geq 40$	R\$ 609.462,36
	Feminino	$e < 20$	R\$ 358.233,60
		$20 \leq e < 40$	R\$ 214.056,83
		$e \geq 40$	R\$ 151.030,17
Mediana	Masculino	$e < 20$	R\$ 510.016,58
		$20 \leq e < 40$	R\$ 301.610,57
		$e \geq 40$	R\$ 213.392,46
	Feminino	$e < 20$	R\$ 125.429,15
		$20 \leq e < 40$	R\$ 74.948,21
		$e \geq 40$	R\$ 52.880,54
Externa	Masculino	$e < 20$	R\$ 6.204,19
		$20 \leq e < 40$	R\$ 3.669,00
		$e \geq 40$	R\$ 2.595,85
	Feminino	$e < 20$	R\$ 1.525,81
		$20 \leq e < 40$	R\$ 911,72
		$e \geq 40$	R\$ 643,28
Total:			R\$ 4.944.668,81

Com a finalidade de dar uma visão geral do problema, a tabela 5.8 foi montada com os totais obtidos de EC por pluma e gênero, mostrando o somatório dos custos estimados para cada valor de ERR.

TAB. 5.8 Totais por pluma, gênero e EC de valores estimados para casos novos.

Gênero	Pluma Interna	Pluma Mediana	Pluma Externa	EC
Masculino	R\$ 2.927.520,85	R\$ 1.025.019,60	R\$ 12.469,05	R\$ 3.965.009,50
Feminino	R\$ 723.320,60	R\$ 253.257,91	R\$ 3.080,80	R\$ 979.659,31
Total por pluma	R\$ 3.650.841,45	R\$ 1.278.277,51	R\$ 15.549,85	R\$ 4.944.668,81

O custo pela linha de base (C_{LB}) refere-se ao produto entre a taxa bruta calculada pelo INCA (180 novos casos para o gênero masculino e 210 para o feminino) e o valor estimado para tratamento (R\$ 2.250,00). A tabela 5.9 sugere valores estimados para o C_{LB} em relação aos valores de EC, assim como a equivalência entre ambos os valores.

TAB. 5.9 Custo pela linha de base (C_{LB}) e pelo ERR (EC).

Gênero	C_{LB}	EC
Masculino	R\$ 405.000,00	R\$ 3.965.009,50
Feminino	R\$ 472.500,00	R\$ 979.659,31
Total	R\$ 877.500,00	R\$ 4.944.668,81
Equivalência	EC = 5,63 C_{LB}	

De acordo com a tabela 5.9, o valor de EC é cerca de 560% maior do que C_{LB} para o cenário em estudo. Esta estimativa pode auxiliar a plataforma orçamentária quando complementada com os valores de C_L . A figura 5.9 mostra a relação entre os valores de EC, C_{LB} e o somatório entre ambos em função da TED.

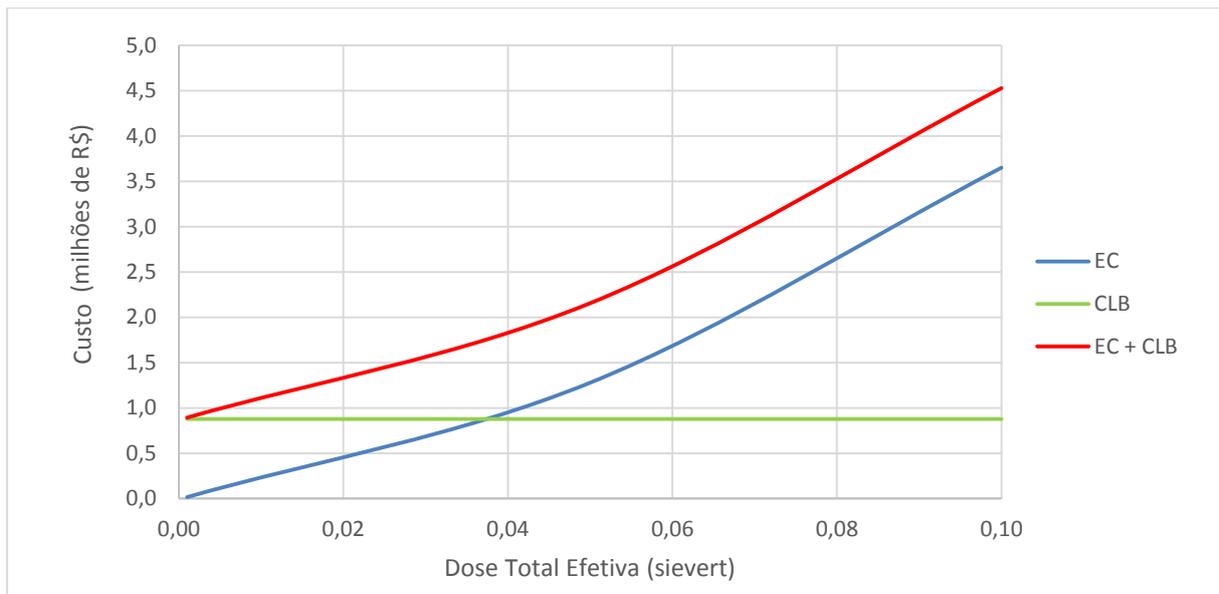


FIG. 5.9 Custos em função da TED nos indivíduos irradiados.

O valor de C_{LB} se mantém constante, pois não considera o evento, enquanto que EC possui dependência com TED. O somatório $EC + C_{LB}$ representa o custo total estimado, considerando a taxa de ocorrência municipal para leucemia e o custo estimado para o cenário.

5.5 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE IMPACTO FINANCEIRO

Entende-se por metodologia as ações lógicas e estruturadas, definindo uma linha de ação que tende a ser ágil e eficaz para determinada situação (O'BRIEN, 2001). Aplicando este conceito, a estimativa de impacto financeiro para leucemia no cenário RDD, requer observações minuciosas. A figura 5.10 resume a metodologia criada para estimativa de impacto financeiro na área da saúde, ao se tratar de um cenário RDD.

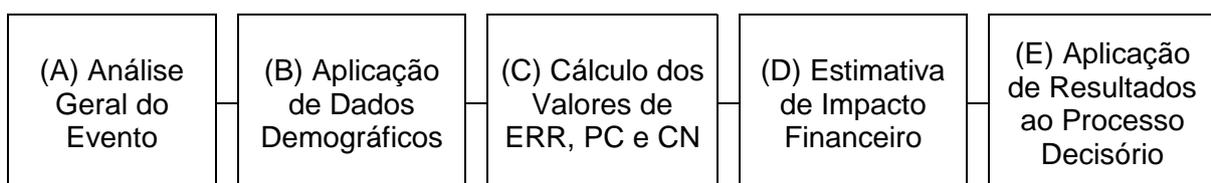


FIG. 5.10 Metodologia para estimativa de impacto financeiro em cenário RDD.

(A) Análise Geral do Evento

São considerados para efeito de análise do evento, principalmente: (a) elemento radioativo empregado, (b) local, (c) horário da deflagração e (d) público externo dentro da área das plumas de isodoses. Dados adicionais também são de relevância, como por exemplo, as condições meteorológicas do local do incidente e a velocidade do vento. A partir destes dados integrados, o HotSpot calcula o cenário mais conservativo, incluindo a área das plumas, o que auxilia no cálculo da população aproximada no local.

(B) Aplicação de Dados Demográficos

Requer auxílio do órgão responsável pelo levantamento estatístico sobre a demografia local, estabelecendo a densidade demográfica na região e os percentuais entre gêneros e faixas etárias, permitindo determinar o número aproximado de pessoas atingidas.

Além de estudos demográficos, o levantamento da linha de base para o aparecimento de diversas morbidades possíveis de serem analisadas torna-se importante, pois a partir desses dados pode-se estimar a quantidade de novos casos a serem gerados devido ao incidente.

(C) Cálculo dos Valores de ERR, PC e CN

Neste momento torna-se necessária a escolha das morbidades a serem estudadas para a estimativa do impacto financeiro, pois suas equações de ERR devem ser selecionadas segundo o modelo BEIR V. O cálculo do ERR torna-se fundamental, pois a partir dele pode-se realizar comparações com valores da linha de base e assim estimar novos casos por gênero e faixa etária. Em seguida, determina-se o PC, que é o indicador de correlação entre causa e efeito. Sendo ERR o percentual que representa CN, que pode ser estimado ao multiplicar cada valor de ERR pela taxa de incidência da linha de base nacional, de maneira a proporcionar a estimativa de excesso de custo por divisões de gênero e faixa etária.

(D) Estimativa de Impacto Financeiro

Utilizando a função de EC (14), a TED, os custos de otimização em incidentes, os custos de tratamento e logísticos devem ser analisados, oferecendo estimativas de impacto financeiro. A partir das estimativas, é possível analisar o valor de EC para tratamento acima do esperado pela linha de base para uma determinada morbidade.

A comparação dos gastos estimados para novos casos ocorre pelo quociente entre o EC e C_{LB} , que remete ao tratamento da população que se enquadra na linha de base de determinada morbidade, utilizando o mesmo tipo de tratamento. O C_{LB} pode ser estimado pelo produto entre a taxa bruta estatística da morbidade em análise, e o gasto para o tratamento da doença.

(E) Aplicação de Resultados ao Processo Decisório

As plumas de isodoses calculadas pelo HotSpot fornecem a área afetada pela deflagração do RDD, possibilitando a análise dos níveis de radiação em cada pluma e tomada de decisões necessárias quanto à evacuação de habitantes e definição da área contaminada, estabelecendo linhas de ação a partir dos valores de ERR.

6 CONCLUSÃO

Considerando uma situação estática, o cenário mais conservativo pós deflagração foi calculado pelo código HotSpot, onde apenas o vento foi considerado como fator de arraste. O estudo a partir deste cenário pode produzir uma avaliação conservativa de danos, pois calcula áreas de contaminação considerando o cenário radiológico com maior dano em nível de exposição à radiação ionizante.

A utilização de apenas uma morbidade foi considerada, visando facilitar a aplicação da metodologia para estimativa de impacto financeiro, onde uma análise completa do cenário requer estimativas para diversas morbidades decorrentes além da leucemia, tomada como exemplo.

A metodologia de convergência descrita neste trabalho propôs a associação de um código computacional (HotSpot), um modelo bioestatístico (BEIR V), estatísticas demográficas (IBGE), estimativas de incidência de leucemia (INCA), custos de otimização (CNEN) e de tratamento pré-estabelecidos (SUS).

A aplicação da metodologia de convergência forneceu condições de análise parcial de um problema a partir de plataformas estanques, finalizando com uma proposta de equacionamento do impacto financeiro, ainda que parcial.

Para as estimativas do impacto financeiro, foi considerado o valor aproximado de tratamento de leucemia por TBI, pré-transplante de medula óssea, oferecido pelo SUS, assim como o valor de otimização por dose coletiva, estipulado pela CNEN para eventos radiológicos. Tratando de metodologia, a equivalência entre o valor de excesso de custo e custo pela linha de base é a condição para análise e comparação de custos. No cenário, a metodologia permitiu estimar o custo devido ao incidente RDD como cerca de 6 vezes o custo calculado pela linha de base. Este resultado mostra que a metodologia utilizada é capaz de oferecer meios para que o processo decisório possa contar com informações relevantes e com base científica.

Neste trabalho, as faixas de probabilidade de causa impactariam o valor de excesso de custo, pois foram utilizados os limiares estabelecidos para causa de leucemia, considerando cada faixa etária e gênero, estimando os custos proporcionados por indivíduos que possuam probabilidade de desenvolvê-la, devido

à exposição à radiação ionizante.

A metodologia apresentada possui consistência e robustez para auxiliar o processo decisório, pois, apesar de contar com erros associados às funções do BEIR V, trabalha com estatísticas reais e atualizadas de órgãos nacionais. As barras de erros referentes às funções do BEIR V sugerem padronização do relatório para a população brasileira, uma vez que não há metodologia de estimativa de riscos relativos em âmbito nacional para cenários desta natureza.

Diferentes análises podem ser desenvolvidas, além do impacto financeiro, com base na metodologia sugerida. A utilização de códigos de modelagem computacional pode determinar: (a) estimativas de TED sobre seres humanos expostos à radiação ionizante; (b) estimativas da área comprometida por material radioativo; (c) levantamento demográfico; (d) análise de riscos e (e) organização de dados financeiros.

O trabalho contou com a abordagem sobre um cenário em que as ações assimétricas (uso de um RDD) são fictícias, enquanto que os dados meteorológicos e demográficos são reais para o município do Rio de Janeiro, assim como os dados fornecidos pela CNEN, INCA e SUS.

A metodologia apresentada dá suporte ao processo decisório em caso de incidentes radiológicos, chamando a atenção para necessidades de organização da resposta. Essa abordagem configura-se um exemplo moderno de integração de plataformas para um objetivo comum, acelerando e dando base científica para ações políticas de resposta a emergências desta natureza.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC.MED.BR. **Leucemias: o que são? Quais os tipos? Como é diagnosticada e tratada?**. 2012. Disponível em: <<http://www.abc.med.br/p/cancer/262410/leucemias-o-que-sao-quais-os-tipos-como-e-diagnosticada-e-tratada.htm>>. Acesso em: 5 fev. 2014.
- BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION V (BEIR V). **National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation**. Natl Acad. Press. Washington, DC. 1990.
- BIRAL, A. R.; **Radiações Ionizantes para médicos físicos e leigos**; editora Insular, São Paulo. 2002
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Norma CNEN-NN-3.01:2011. Rio de Janeiro: CNEN, Setembro de 2011.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica**. Posição Regulatória 3.01/002:2011. Rio de Janeiro: CNEN. 2011.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Medidas de Proteção e Critérios de Intervenção em Situações de Emergência**. Posição Regulatória 3.01/006:2011. Rio de Janeiro: CNEN. 2011.
- CORREA, E. B. M., N. O.; SILVA, R. M.; SILVA DE SOUZA, L.; CATALDI, M.; PIMENTEL, L. C. G. **Análise da sensibilidade do modelo MM5 aos refinamentos e aninhamentos de grades – Um estudo de caso sobre a cidade do Rio de Janeiro**. Congresso Brasileiro de Metrologia. Fortaleza-CE, SBMET. 2004.
- DROPKIN, Greg. **Low dose radiation and cancer in A-bomb survivors: latency and non-linear dose-response in the 1950–90 mortality cohort**. Environmental Health. 2007.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Guideline on Air Quality Models, OAQPS Guideline Series No. 1.2-080, Report EPA-45012-78-027**. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC. USA. 1978.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Protection Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents**. Draft for Interim Use and Public Comment. USA. 2013.

- FEDERAL GUIDANCE REPORT No. 11 – FGR 11. **Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion.** EPA 520/1-88-020. 224 p. USA. 1988.
- FEDERAL GUIDANCE REPORT No. 12 – FGR 12. **External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil.** EPA. 238 p. USA. September, 1993.
- FEDERAL GUIDANCE REPORT No. 13 – FGR 13. **Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides.** EPA 402-R-99-001. 335 p. USA. September, 1999.
- FISCHBACH, E., CHEN, K. J., GOLD, R. E., GOLDSTEN, J. O., LAWRENCE, D. J., MCNUTT JR., R. J., RHODES, E. A., JENKINS, J. H., LONGUSKI, J. **Solar influence on nuclear decay rates: constraints from the MESSENGER mission.** Astrophysics and Space Science. Vol. 337, Issue 1, pág. 39-45. Janeiro, 2012.
- FOOD AND DRUG ADMINISTRATION – FDA. **Accidental Radioactive Contamination of Human Food and Animal Feeds: Recommendations for State and Local Agencies.** Office of Health and Industry Programs, Center for Devices and Radiological Health, HHS. 1998
- FOOD AND DRUG ADMINISTRATION – FDA. **Potassium Iodide as a Thyroid Blocking Agent in Radiation Emergencies.** Center Drug Evaluation and Research, HHS. 2001.
- GARÓFOLO, A., AVESANI, C. M., CAMARGO, K. G., BARROS, M. E., SILVA, S. R. J., TADEII, JAAC, et. al. **Dieta e câncer: um enfoque epidemiológico.** Rev Nutr. 2004;17(4):491-505.
- GIFFORD, F. A., Jr. **Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution Applications, Lectures on Air Pollution and Environment Impact Analyses,** pp. 3558. American Meteorological Society, Boston, MA, 1975.
- GORDON, B. G., WARKETIN, P. I., STRANDJORD, S. E., ABROMOWITCH, M., BYEVER, E., HARPER, J. L., COCCIA, P. F. **Allogeneic Bone Marrow Transplantation for Children With Acute Leukemia: Long-term Follow-up of Patients Prepared With High-dose Cytosine Arabinoside and Fractionated Total Body Irradiation.** Bone Marrow Transplant 20(1): 5-10. 1997.
- GUIMARÃES, Janaina Barbosa. **Caracterização nutricional da população atendida no Serviço de Oncologia Pediátrica do Hospital da Lagoa, RJ.** 2012. 34 f. Monografia - Apresentada no curso de Graduação em Nutrição, da Universidade Gama Filho, para obtenção do grau de Nutricionista.
- HAMERSCHLAK, Nelson. **Leucemia: Fatores prognósticos e genética.** Hospital Israelita Albert Einstein. Programa de Hematologia e Unidade de Transplantes de Medula Óssea. 2008.

- HOMANN, Steven G. **HotSpot Health Physics Codes Version 2.07 User's Guide**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA. 2009.
- HOMANN, Steven G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA. 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo 2010. **População residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, em números absolutos e relativos, com indicação da área total e densidade demográfica, segundo os municípios – Rio de Janeiro – 2010**. Tabela 2.1.19. IBGE; 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER; MINISTÉRIO DA SAÚDE – INCA. **Estimativas da incidência e mortalidade por câncer**. Rio de Janeiro: INCA; 2014.
- INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER; MINISTÉRIO DA SAÚDE – INCA. **Incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro: INCA; 2007.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Categorization of Radioactive Sources**. IAEA – TECDOC – 1344. 2003.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Incident and Trafficking Database (ITDB)**. Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control. 2014.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Methods for Estimating the Probability of Cancer from Occupation Radiation Exposure**. TECDOC – 870. 1996.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION – ICRP. **Annals of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 30, Part 1, Volume 2, No. 3/4, Pergamon Press. New York, USA. 1981.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION – ICRP. **Annals of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 60, p. 209. The International Commission on Radiological Protection. Oxford, UK. 1991.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION – ICRP. **Annals of the International Commission on Radiological Protection**. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. 1994.
- JEONG, H. J., HWANG, W. T., EUN, H. K. **Radiological risk assessment for an urban area: Focusing on an air contamination event**. Annals of Nuclear Energy. 2010.
- KATO, Hiroo, SHIMIZU, Yukiko. **Effects of A-bomb radiation on the human body**. Cancer mortality in A-bomb survivors. IAEA. Japão. 1992.

- KNOLL, Glenn F. **Radiation Detection and Measurement**. 3 ed. John Wiley & Sons, Inc. 1999.
- LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. Editora UNESP. 2 Ed. 2003
- LEAL, Carmen Helena Seoane; FILHO, Victor Wünsch. **Mortalidade por Leucemias Relacionadas à Industrialização**. Universidade de São Paulo. Departamento de Epidemiologia da Faculdade de Saúde Pública. 2002.
- MACHADO, Liliane dos Santos. **A Realidade Virtual no Modelamento e Simulação de Procedimentos Invasivos em Oncologia Pediátrica: Um Estudo de Caso no Transplante de Medula Óssea**. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2003.
- NANCE, Malcolm W. **Terrorist Recognition Handbook: A Practitioner's Manual for Predicting and Identifying Terrorist Activities**. 2 ed. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2008.
- O'BRIEN, R. **Um exame da abordagem metodológica da pesquisa de ação**. Teoria e Prática da Pesquisa de Ação. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa: 2001.
- OSAZA, Kotaro; SHIMIZU, Yukiko; SUYAMA, Akihiko; KASAGI, Fumiyoshi; SODA, Midori; GRANT, Eric J.; SAKATA, Ritsu; SUGIYAMA, Hiromi; KODAMA, Kazunori. **Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases**. Radiation Research Society. 2012.
- PASCHOA, A. S.; DANTAS, B. M. **An attempt to evaluate the risks associated with radiological terror**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. CNEN. Brasil. Rio de Janeiro: 2014.
- PASQUILL, F. **Atmospheric Diffusion**, 2nd. ed. John Wiley & Sons, New York, USA. 1974.
- PASQUILL, F. **The Estimation of Dispersion of Windborne Material**, Meteorology, 90, pp. 3349. 1961.
- PETERSON, John; MACDONELL, Margaret; HAROUN, Lynne; MONETTE, Fred. **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas**. Argonne National Laboratory. Environmental Science Division. 2007.
- PRESTON, D. L., KUSUMI, S., *et al.* **Cancer incidence in atomic-bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma, and multiple myeloma**. Radiation Research. 1994.

- PRESTON, D. L., PIERCE, D. A., *et al.* **Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates.** Radiation Research 2004; 162:377-89
- REICHMUTH, Barbara; SHORT, Steve; WOOD, Tom; RUTZ, Fred; SCHWARTZ, Debbie. **Economic consequences of a Rad/Nuc attack: cleanup standards significantly affect cost.** Pacific Northwest National Laboratory. EUA: Washington. 2005.
- RESHETIN, V. P. **Estimation of radioactivity levels associated with a 90Sr dirty bomb event.** Atmospheric Environ 39(25):4471–7. 1995.
- SILVA, D. B.; PIRES, M. M. S.; NASSAR, S. M. **Câncer pediátrico: análise de um registro hospitalar.** J Pediatr. 2002;78(5):409-14.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE RADIOTERAPIA – SBR. **Tabela do Sistema Único de Saúde (SUS) para tratamentos de radioterapia – 2010.** URL: <<http://www.sbradioterapia.com.br/detArtigo.php?id=15&catogo=NOT%C3%83%C2%8DCIAS>>. Acessado em 19 de Setembro de 2014.
- SPENCER, R. C.; LIGHTFOOT, N. F. **Preparedness and Response to Bioterrorism.** J Infect. Vol. 43. 104 – 110 p. 2001.
- STENMEYER, K. Paul. **Differences Between a Fission Bomb and a Dirty Bomb.** RSA Publications. Division of Radiation Safety Associates, Inc. 2004.
- SUTTON, O. G. **Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere.** Proceedings of the Royal Society, London, UK. 1932.
- TAUHATA, Luiz; SALATI, Ivan P.A.; PRINZIO, Renato Di; PRINZIO, Antonieta R. Di. **Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear. 9ª revisão. 373 p. Rio de Janeiro: Novembro de 2013.
- UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION – U.S. NRC. 2014. **Glossary.** URL: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/total-effective-dose-equivalent-tede.html>>. Acessado em 20 de Outubro de 2014.
- VALVERDE, Nelson; LEITE, Teresa; MAURMO, Alexandre. **Manual de Ações Médicas em Emergências Radiológicas.** 112 p. Fundação Eletronuclear de Assistência Médica. Eletrobras Eletronuclear. Rio de Janeiro: 2010.
- VILLATE, Jaime E. **Espectro eletromagnético.** Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Portugal. 2013.
- YVES, Thalys L. A. Saint. **Potenciais impactos ambientais e riscos para a saúde humana decorrentes de explosão de um dispositivo de dispersão radiológica (RDD).** 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2014.

YVES, Thalys L. A. Saint; CABRAL, Paulo A. M.; BRUM, Tercio; ROTHER, Fagner C.; ALVES, Paulo F. P. M.; LAURIA, Dejanira C.; ANDRADE, Edson R. de. **Terrorist Radiological Dispersive Device (RDD) Scenario and Cancer Risk Assessment.** Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 971-983. 2012.

ZIMMERMAN, Peter D.; LOEB, Cheryl. **Dirty Bombs: The Threat Revisited.** Defense Horizons. 2004.

8 APÉNDICE

8.1 ANÁLISE DE EVENTO RADIOLÓGICO

TAB. 8.1 Descrição do cenário modelado.

ANÁLISE DE EVENTO RADIOLÓGICO	
(A) ESTUDO DA SITUAÇÃO	
1.	Descrição do evento:
2.	Local do incidente:
3.	Coordenadas geográficas:
4.	Horário aproximado da deflagração:
5.	Possibilidade de eventos externos no local: [] Não [] Sim
a.	Quantidade de possíveis eventos externos:
b.	Local de cada evento:
c.	Coordenadas geográficas de cada local:
d.	Número de pessoas em cada local:
e.	Total de público externo:

TAB. 8.2 Descrição do cenário modelado (continuação TAB. 8.1).

(B) DADOS DE ENTRADA: HOTSPOT	
1. Modelo de dispersão atmosférica:	
<input type="checkbox"/> Explosão com Plutônio	<input type="checkbox"/> Ressuspensão com Trítio
<input type="checkbox"/> Incêndio com Plutônio	<input type="checkbox"/> Explosão Geral
<input type="checkbox"/> Ressuspensão com Plutônio	<input type="checkbox"/> Incêndio Geral
<input type="checkbox"/> Explosão com Urânio	<input type="checkbox"/> Ressuspensão Geral
<input type="checkbox"/> Incêndio com Urânio	<input type="checkbox"/> Pluma Geral
2. Radionuclídeo:	
3. Meia-vida:	
4. Atividade da fonte:	
5. Quantidade de explosivo:	
6. Velocidade do vento:	
7. Classe de estabilidade: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> F	
8. Direção do vento (graus):	
9. Altura média dos receptores:	
10. Fatores de conversão de dose:	
<input type="checkbox"/> FGR-11 <input type="checkbox"/> FGR-13 <input type="checkbox"/> Coeficientes para Conversão de Dose Aguda	
11. Terreno: <input type="checkbox"/> Básico <input type="checkbox"/> Cidade	
12. Tempo de exposição: a. Início: b. Duração:	
13. Valores TED para contorno das plumas:	
a. Pluma interna:	
b. Pluma mediana:	
c. Pluma externa:	

TAB. 8.3 Descrição do cenário modelado (continuação TAB. 8.2).

(C) DEMOGRAFIA LOCAL
1. Densidade demográfica:
2. Área da pluma externa:
3. Número aproximado de habitantes afetados:
4. Habitantes + Público externo:

TAB. 8.4 Descrição do cenário modelado (continuação TAB. 8.3).

(D) EQUAÇÃO BEIR V
1. Morbidade:
2. Equação BEIR V: