



MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIAS PARA CENÁRIOS RADIOLÓGICOS  
PARAMETRIZADA POR FATORES AMBIENTAIS

Ubiratan de Carvalho Oliveira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva, D.Sc

Rio de Janeiro

Janeiro de 2023

MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIAS PARA CENÁRIOS RADIOLÓGICOS  
PARAMETRIZADA POR FATORES AMBIENTAIS

Ubiratan de Carvalho Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Prof. Ademir Xavier da Silva

Aprovada por: Profa. Inayá Corrêa Barbosa Lima

Prof. Edson Ramos de Andrade

Dr. Hélio de Carvalho Vital

Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior

Oliveira, Ubiratan de Carvalho

Modelagem de consequências para cenários radiológicos parametrizada por fatores ambientais / Ubiratan de Carvalho Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 58-62.

1. RDD. 2. Detonação Nuclear. 3. População Potencialmente afetada.

Dedico este trabalho a minha amada esposa, Ana Oliveira, aos meus queridos filhos, Paulo e Roberto, à minha nora Caroline e minha princesa neta Alice.

Ao meu Orientador Prof. Ademir por estar ao meu lado em momentos como este.

Ao meu amigo, Prof. Edson Ramos de Andrade, que me mostrou a importância da Ciência.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder ferramentas para a batalha do dia a dia e estar sempre comigo.

A minha esposa, por ser meu porto seguro e pelas sábias palavras de incentivo no momento certo para alcançar cada vitória em minha vida. Te devo tudo.

Aos meus filhos por estarem sempre ao meu lado. Amo vocês.

A minha nora por ser a filha que não tive.

A minha neta, minha princesa, meu incentivo à vida.

Ao meu orientador, Prof. Ademir Xavier da Silva, meus sinceros agradecimentos pela orientação objetiva e segura e pela forma sempre muito serena que me orientou ao longo deste trabalho, me permitindo sempre muita liberdade para trabalhar.

Muito especialmente, ao professor Edson Ramos de Andrade que, por nunca me abandonar, estando sempre comigo na pesquisa acadêmica, me mostrou o real sentido do ser doutor. Um gigante de formato simples. Obrigado por tudo.

Aos membros da banca, uma honra tê-los presentes.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram com este trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIAS PARA CENÁRIOS RADIOLÓGICOS PARAMETRIZADA POR FATORES AMBIENTAIS

Orientador: Ademir Xavier da Silva

### RESUMO

Já há algum tempo o setor nuclear vem apresentando um aumento em suas atividades e com isso uma sensível necessidade de ampliação das condições de proteção e segurança da sociedade, se torna um fator preponderante para garantir uma estabilidade social e impedir que situações provenientes de acidentes provocados ou não, alcancem uma escala que dificulte uma regressão à situação de normalidade. Um tipo de acidente provocado é a detonação de um Dispositivo de Dispersão Radiológica (do inglês, RDD), que uma vez liberado pode conduzir a um elevado grau de exposição radiológica à sociedade, causando sérios transtornos e dificuldades de condução da situação pela gestão. Uma modelagem de situação em tempo real pode assessorar o poder decisório na tomada de decisões sobre o como, o que e quando realizar atividades para atenuar os problemas decorrentes do evento. Este trabalho propõe uma modelagem de situação da detonação de um RDD em um teatro de operações qualquer, utilizando como ferramenta assessória o código *Hotspot*. Esta modelagem permite estimar a dose em uma certa posição em um tempo determinado ou ao contrário, bem como estimar a população potencialmente afetada e uma estimativa do custo de detrimento e os impactos econômicos futuros na condução da saúde pública. Toda essa situação é feita para vários cenários que envolvem diferentes classes de estabilidade, definidas como classes de Pasquill-Gifford, que estabelecem as condições meteorológicas do local. Dessa forma, essa ferramenta objetiva dar suporte às tomadas de decisão posteriores à detonação de um RDD.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CONSEQUENCES MODELING FOR RADIOLOGICAL SCENARIOS  
PARAMETRIZED BY ENVIRONMENTAL FACTORS

Advisors: Ademir Xavier da Silva, D.Sc

ABSTRACT

For some time now, the nuclear sector has been presenting an increase in its activities and, with this, a sensitive need to expand the protection and safety conditions of the population, it becomes a preponderant factor to ensure social stability and prevent situations arising from accidents caused or not, reach a scale that makes a regression to a situation of normality difficult. A type of accident is caused by the detonation of a Radiological Dispersion Device (RDD), which, once released, can lead to a high degree of radiological exposure to the population, causing serious inconvenience and difficulties in conduction of the situation by management. A real-time situation modeling can advise decision-makers power in making decisions about how, what and when to carry out activities to mitigate the problems arising from the event. This work proposes a modeling of the situation of the detonation of an RDD in any theater of operations, using the Hotspot code as an accessory tool. This modeling allows estimating the dose in a certain position in a given time or the other way around, as well as estimating the potentially affected population and an estimate of the cost of the detriment and the future economic impacts on the conduct of public health. This whole situation is made for several scenarios that involve different stability classes, defined as Pasquill-Gifford classes, which establish the local meteorological conditions. Thus, this tool aims to support decision-making after the detonation of an RDD.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xii
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral.....	5
1.2. Objetivo específico.....	5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1. Ameaças radiológicas e nucleares ao Meio Ambiente.....	6
2.2. Grandezas dosimétricas.....	8
2.2.1. Dose absorvida .....	9
2.2.2. Dose equivalente.....	9
2.2.3. Dose efetiva .....	10
2.2.4. Dose equivalente comprometida .....	11
2.2.5. Dose equivalente efetiva comprometida .....	11
2.2.6. Dose total efetiva equivalente .....	11
2.3. Dispositivo de Dispersão Radiológica .....	12
2.4. Dispositivos Nucleares Improvisados .....	12
2.5. Comparações entre acidentes nucleares e terrorismo.....	13
2.6. Efeitos Biológicos das Radiações.....	14
2.7. Síndrome Aguda da Radiação .....	15
2.8. HotSpot.....	20
2.8.1. Distribuição Gaussiana.....	21
2.8.2. Distribuição Gaussiana no código HotSpot.....	22
2.8.3. Dispersão radiológica ambiental.....	23
2.8.4. Estabilidade Atmosférica.....	24
2.8.5. Monitoração radiológica urbana para RDD e IND.....	28
3. METODOLOGIA.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5. CONCLUSÕES.....	79
6. REFERÊNCIAS.....	80
7. ANEXO.....	85



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Enfoques combinados baseados nas iniciativas atuais de atuação em área de risco radiológico.....	7
Figura 2.2 - Esquema de uma bomba suja (RDD).....	12
Figura 2.3 - Possíveis vias de exposição. ....	15
Figura 2.4 - Sub-síndromes associadas à SAR. ....	16
Figura 2.5 - Quadro resumo dos principais eventos decorrentes da SAR. ....	18
Figura 2.6 - Coordenadas utilizadas no código HotSpot.....	21
Figura 2.7 - Representação gráfica das equações para $\sigma_y$ em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão.....	27
Figura 2.8 - Representação gráfica das equações para $\sigma_z$ em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão.....	28
Figura 3.1 – Código HotSpot – Página dos receptores.....	35
Figura 3.2 – Arquivo texto (txt) gerado pelo código HotSpot sem receptores.....	36
Figura 3.3 – Aba da classe A – Inserção dos limites da classe.....	37
Figura 3.4 – Código HotSpot – Página dos receptores com posições inseridas.....	38
Figura 3.5 – Arquivo texto gerado pelo HotSpot com parâmetros por posição.....	38
Figura 3.6 – Software CurveExpert – Inserção de valores e definição de função.....	39
Figura 3.7 – Software CurveExpert – Função definida.....	40
Figura 3.8 – Aba da classe A – Inserção da função e seus coeficientes.....	41
Figura 3.9 – Suplanilha geral – Inserção da posição.....	42
Figura 3.10 – Aba geral – Inserção da dose e do tempo.....	43
Figura 3.11 – Aba geral – Inserção da estrutura urbana.....	44
Figura 3.12 – Código HotSpot – Área de cada pluma.....	45
Figura 3.13 – Aba geral – Inserção da densidade demográfica na área da posição escolhida.....	46
Figura 3.14 – Aba geral – Determinação do custo de detrimento.....	46
Figura 3.15 – Aba geral – Inserção de parâmetros para mudança de classe.....	47
Figura 3.16 – Aba geral – Determinação das doses absorvidas nas classes anterior e atual.....	48
Figura 3.17 – Tempo para atingir a dose estipulada.....	49
Figura 4.1 – Modelos ( <i>Models</i> ) no HotSpot.....	55
Figura 4.2 – Dados da fonte ( <i>Source Term</i> ) no HotSpot.....	56

Figura 4.3 – Dados meteorológicos ( <i>Meteorology</i> ) no HotSpot.....	57
Figura 4.4 – Dados das posições ( <i>Receptors</i> ) no HotSpot.....	58
Figura 4.5 – Configurações ( <i>Setup</i> ) no HotSpot.....	60
Figura 4.6 – Dados de saída ( <i>Output</i> ) no HotSpot.....	61
Figura 4.7 – Arquivo de saída, com extensão txt, com os valores inseridos e as tomadas de taxas de doses em cada isodose.....	63
Figura 4.8 – Isodoses com respectivas áreas.....	64
Figura 4.9 – Extensão linear da zona interna.....	65
Figura 4.10 – Arquivo de saída, com extensão txt, com os valores inseridos nas posições dentro da zona interna.....	67
Figura 4.11 – Gráfico das isodoses.....	68
Figura 4.12 – Receptores marcados para a zona interna na Classe A.....	69
Figura 4.13 – Receptores marcados para a zona mediana na Classe A.....	69
Figura 4.14 – Receptores marcados para a zona externa na Classe A.....	70
Figura 4.15 – Posições e taxas de doses para Classe A zona interna no CurveExpert.....	71
Figura 4.16 – Escolha da função que mapeia a relação posição x taxa de dose.....	72
Figura 4.17 – Gráfico da função posição x taxa de dose para a Classe A zona interna.....	72
Figura 4.18 – Lançamento da função no simulador.....	73
Figura 4.19 – Escolha da posição para estimativa dos dados.....	74
Figura 4.20 – Escolha da dose e do tempo na posição para estimativa dos dados.....	75
Figura 4.21 – Lançamento da densidade demográfica da região para estimativa do número de indivíduos potencialmente afetados e custo de detrimento.....	75
Figura 4.22 – Aumento do tempo de exposição.....	76
Figura 4.23 - Comparativo de valores entre 3h e 96h.....	76
Figura 4.24 – Mudança de Classe.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Valores dos fatores de ponderação da radiação ( $W_R$ ), utilizados neste trabalho, de acordo com a ICRP 103 (2007). .....	10
Tabela 2. 2 - Alguns fatores de peso de órgãos e tecidos ( $W_T$ ) específicos para o cálculo de dose efetiva de acordo com a ICRP 103 (2007). .....	11
Tabela 2. 3 - Síndrome Aguda da Radiação .....	17
Tabela 2. 4 - Sintomas de doença resultantes da exposição aguda à radiação ionizante, em função do tempo. ....	17
Tabela 2.5 - Condições meteorológicas para definir a classificação da estabilidade atmosférica de categorias de A a F utilizadas no HotSpot.....	25
Tabela 2.6 - Coeficientes de difusão $\sigma_y$ e $\sigma_z$ para terreno padrão.....	26
Tabela 2.7 - Coeficientes de difusão $\sigma_y$ e $\sigma_z$ para terreno urbano.....	27
Tabela 3.1 – Legenda das estruturas urbanas (blindagem).....	43
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na simulação do cenário.....	54

## 1. Introdução

Em uma atmosfera política de incertezas, internas e externas, potenciais ameaças tais como a utilização de artefatos bélicos nucleares e/ou radiológicos em ações não convencionais (assimétricas), vêm se caracterizando pelo uso de instrumentos que são marcadamente indicadores de assimetrias operacionais, táticas e estratégicas entre os envolvidos, como exemplo deste tipo de ação normalmente se apresentam ações típicas de terrorismo. Em 22 de janeiro de 2019 foi encontrado em um ferro velho em Arapiraca, Alagoas, uma cápsula de Raio X contendo Cesio-137, as autoridades chegaram à peça por meio de uma denúncia anônima. Essa cidade fica a 130 km de Maceió e contém cerca de 200 mil habitantes. Não houve indícios de vazamento de material. Eventos como esse constituem uma fundamental fonte de preocupação para as esferas de poder que são responsáveis pela tomada de decisão, considerando eventos dessa natureza (SANTOS, 2019).

Nos casos de interesse para este trabalho de tese, elementos que podem conferir maior grau de assimetria podem ser os que apresentem maiores dificuldades de acesso, como os materiais perigosos de origem química, biológica, radiológica e nuclear (QBRN), configurando-se o que denomina ameaça QBRN na literatura especializada (BARTENFELD, PEACOCK ET AL. 2014, DORANDEU AND GILLET 2017, CHILCOTT, LARNER ET AL. 2018, KAKO, HAMMAD ET AL. 2018). Para este estudo a atenção se concentra nas vertentes radiológica e nuclear do espectro QBRN.

As diversas ações com potencial para provocar danos tanto ao meio ambiente quanto aos habitantes constituem uma fundamental fonte de preocupação para as esferas de poder que são responsáveis pela tomada de decisão. Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas buscando tanto dar apoio à tomada de decisão quanto ao desenvolvimento de medidas e contramedidas adequadas a uma resposta de maior efetividade. A mitigação de impactos busca otimizar a remediação nas principais esferas de projeção de consequências quais sejam: (a) individual, (b) ambiental e (c) política (Porter and Lee 2007).

De forma geral, podem ser consideradas duas perspectivas táticas para esta classe de problemas envolvendo terrorismo radiológico ou nuclear, os dispositivos nucleares improvisados (IND – *Improvised Nuclear Device*) e os dispositivos de dispersão radiológica (RDD – *Radiological Dispersive Device*) (Rother, Rebello et al. 2016, Case, Coleman et al. 2018). Os IND são dispositivos capazes de liberar energia nuclear sob a

forma de explosão com consequências que se expressam desde as esferas físicas (mecânicas, térmicas, radiológicas, etc.) até as altas esferas político-sociais, quando o fato de possuir um artefato desta envergadura se configura uma fonte de poder que normalmente é considerado como um poder dissuasório (FLORIG AND FISCHHOFF 2007, METTLER 2012).

Em contrapartida, os RDD são projetados para serem silenciosos e normalmente não têm o objetivo de provocar danos mecânicos ao ambiente ou habitantes, sendo uma expressão de poder assimétrico, no qual o objeto da ação oferece, em alta escala, os efeitos do elemento surpresa comumente associado à possível utilização de um dispositivo desta natureza. Os RDD são projetados de forma artesanal e têm como objetivo principal contaminar grandes áreas provocando desordem, dificultando a avaliação do cenário pelos responsáveis pela tomada de decisão. Desta forma, tanto os IND quanto os RDD são objetos destinados a provocar danos em um ambiente tornando-o degenerado e confuso e as consequências, ainda que por vias diversas, são normalmente relacionadas à elevação do risco radiológico e suas ramificações sobre aspectos ambientais e saúde pública e ambiental (POTTER 2010, WOLBARST, SAINT YVES, CABRAL ET AL. 2012).

Percebe-se um esforço científico na direção de se produzir conhecimento nesta área específica das ameaças (BROGA 2011, CAMERON REED 2011, MEIT, REDLENER ET AL. 2011, ANDERSON AND BOKOR 2013) e ferramentas de simulação computacional têm sido reconhecidas como de importância vital para o exercício das propostas de metodologia de enfrentamento desta classe de problemas (VAN MOORE 2004, ROTHER, REBELLO ET AL. 2016).

Alguns estudos recentes representam o esforço internacional no sentido de se desenvolver metodologias que possam promover o assessoramento do poder decisório para tratar cenários de natureza radiológica e nuclear por meio de modelagem de consequências (ANDRESZ, MORGAN ET AL. 2018, CASE, COLEMAN ET AL. 2018, TAKAHASHI 2018). Este tipo de exercício permite que as decisões voltadas para a solução do cenário tenham como base, razoável noção da potencial capacidade de contaminação ambiental provocada e seus desdobramentos, neles incluindo os impactos ao meio ambiente e à população potencialmente afetada.

Adicionalmente, tem sido percebida a relevância de se proceder a uma avaliação do impacto econômico do cenário numa perspectiva de curto, médio e longo prazo, buscando identificar os potenciais problemas que devam merecer atenção em uma escala

temporal de prioridades operacionais, médicas, sociais e ambientais (GLASER 2015, GALE 2017, CASE, COLEMAN ET AL. 2018, TAKAHASHI 2018). Dentre estes problemas podem ser citados os relacionados ao desenvolvimento de morbidades entre os integrantes da população potencialmente afetada que sejam correlacionados ao evento radiológico ou nuclear.

Dentre os cenários de elevado interesse em avaliação de risco e tomada de decisão no campo do risco tecnológico, estão os que envolvem agentes QBRN, sendo considerados de alta complexidade e interdisciplinaridade (THORNTON, COURT ET AL. 2004, YOUNG AND PERSELL 2004, BE'ERI, OWEN ET AL. 2018, CHILCOTT, LARNER ET AL. 2018, KAKO, HAMMAD ET AL. 2018). O tratamento desses eventos tem envolvido desenvolvimento de protocolos de respostas que possam integrar diversas áreas científicas, levando-se em consideração os níveis operacional, tático e estratégico das ações (KAKO, HAMMAD ET AL. 2018). Essa integração pode ser facilitada quando há aproximação entre a pesquisa científica e as necessidades daqueles que se dedicam ao atendimento desta classe de eventos.

Neste sentido, este trabalho de tese de doutorado propõe a utilização de software dedicado à simulação conservadora de eventos radiológicos e/ou nucleares, que permitem rapidez e estimativa superdimensionada dos dados gerados, sendo considerada em diversos trabalhos como adequada ao apoio imediato em períodos de fase inicial do processo de resposta (GIESECKE, BURNS ET AL. 2012), normalmente dentro da primeira semana do registro do evento. A modelagem proposta neste estudo utiliza uma abordagem metodológica que leva a um processo semelhante ao processo de redução de crise, proposto por Brum e colaboradores (BRUM 2017), como *Lógica de Redução de Crise*, que apresenta semelhança, embora com objetivos diferentes, ao processo que é utilizado pela Organização das Nações Unidas (ONU) por meio do tratado de banimento de testes nucleares conduzida pela Organização do Tratado de Banimento de Testes Nucleares (*Comprehensive Test-Ban Treaty Organization - CTBTO*) que além de estabelecer rotinas de modelagem de evolução de cenários na tentativa de localizar, por aproximação contextual, sítios onde ocorreu explosão nuclear, desenvolve pesquisa científica sobre monitoramento de materiais radiológicos em escala planetária (BIANCHI, LONGO ET AL. 2018, HOFFMAN, LEWIS ET AL. 2018, KUSMIERCZYK-MICHULEC AND BOURGOUIN 2018).

A efetividade deste tipo de abordagem cresce quando fatores intervenientes como (a) dados meteorológicos; (b) radiometria inicial; (c) dados sociais e (d) dados

geográficos locais são conhecidos. A utilização de forma intensiva de recursos de modelagem de consequências numa perspectiva de convergência é uma forma especial de aplicar várias ferramentas existentes que abordam de forma específica diferentes áreas do saber de tal forma que haja um objetivo comum em suas utilizações. O caráter de convergência pode trazer como consequência a otimização da resposta por meio do refinamento das informações prestadas pelo assessoramento à tomada de decisão.

A modelagem de consequências é perspectiva futura e pode ser conduzida tanto por meios de dados iniciais reais quanto, dependendo da urgência, por dados simulados com base em informações cruas fornecidas pelos níveis operacionais de coleta de dados de campo. Neste trabalho a modelagem se dá como alicerce em robusto tratamento de dados iniciais simulados, buscando correlacioná-los, via fatores intervenientes, para previsão rápida de possíveis evoluções e desdobramentos. Desta forma, busca-se correlacionar e integrar dados de forma a oferecer metodologia confiável de avaliação de situação aos tomadores de decisão.

A proposta central deste trabalho é apresentar uma metodologia de avaliação de risco radiológico considerando um evento caracterizado por liberação de material radioativo na atmosfera, que pode ser por meio de acionamento de RDD ou IND. Entretanto, foi escolhida para este estudo a avaliação de um evento RDD pelo fato deste preservar, em boa medida, a integridade física das estruturas da localidade alvo, condição para se estender de maneira preponderante o tratamento a indivíduos do público pela redução de óbitos esperados. As correlações entre os fatores intervenientes selecionados ocorrem com o mínimo de informações iniciais, sendo o software utilizado para simulação o responsável pela geração de dados iniciais atendendo o que determina o operador do código. A aplicação de um modelo gaussiano para avaliação da evolução da contaminação radiológica ambiental dá agilidade para a atividade de apoio à tomada de decisão inicial permitindo melhores condições de avaliação inicial sobre os meios necessários não só para atendimento em tempo real como para antecipação de possíveis cenários subjacentes e desdobramentos tanto em médio e longo prazo como em distâncias variadas do sítio inicial de liberação atmosférica do material radiológico.

Uma vez atingidos os objetivos deste trabalho, espera-se estabelecer uma metodologia que ofereça, ainda que simulados, meios seguros de avaliação inicial de eventos de liberação atmosférica de materiais radioativos. Adicionalmente espera-se conduzir os exercícios de modelagem de consequências de forma que: (a) se possa propor um desenho de um sistema de detecção de radiação que alimente de forma eficiente o

modelo proposto e (b) se possa gerar dados que sejam de interesse para estudos de acompanhamento epidemiológico com vistas ao dimensionamento dos danos sobre população potencialmente afetada. Desta forma, se pode esperar que o trabalho de tese possa alcançar tanto a esfera de saúde ambiental quanto a pública.

### 1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver metodologia para apoio à tomada de decisão, em fase inicial de resposta ao acionamento de um RDD, por meio de modelagem rápida de consequências, permitindo não só uma avaliação inicial sobre o atendimento em tempo real como antecipação de potenciais cenários subjacentes e desdobramentos.

### 1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese são:

(a) simular um cenário RDD via software especialista gratuito e aprovado por organismos internacionais, o código HotSpot;

(b) avaliar a evolução temporal de efeitos sobre população potencialmente afetada e suas relações com os fatores intervenientes considerados relevantes para o cenário RDD simulado;

(c) avaliar o tempo de resposta considerando a integração da taxa de dose, observando os limites de emergência, SAR (Síndrome Aguda da Radiação) e letalidade, ou seja, 100 mSv, 700 mSv e 4 Sv respectivamente em diversas condições de estabilidade climática determinadas pela classificação de Pasquill-Gifford (condições meteorológicas), e

(d) aplicar a metodologia proposta a um cenário RDD simulado deixando clara as vantagens que ela oferece ao apoio à tomada de decisão.



## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Ameaças Radiológicas e Nucleares ao Meio Ambiente.

A proteção ao meio ambiente visando o desenvolvimento sustentável tem sido buscada cada vez mais por diversos países. Nesse contexto a proteção radiológica do meio ambiente se destaca como um interesse especial dos membros da Agência de Energia Nuclear (NEA) da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

Tal preocupação foi suficiente para que a NEA conduzisse fóruns em reuniões com a colaboração da COMISSÃO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA (ICRP). A ICRP tratou desse tema em diversas publicações. Em sua publicação em 1977, relacionou que a proteção radiológica das espécies era diretamente dependente da proteção dada ao ser humano (TAKAHASHI 1977). Em sua publicação de 1991 (ICRP 60) (HARDING 1991), a Comissão estabelece que embora a proteção a algumas espécies possa ser prejudicada, em função do nível de proteção dada ao ser humano, a Comissão estaria preocupada somente com a transferência de radionuclídeos no meio ambiente, porque tal preocupação estaria relacionada à proteção radiológica ao ser humano (HARDING 1991).

Desta forma, é importante buscar uma compatibilização entre os dois sistemas, o homem e o ambiente, tentando comparar ações nos diversos níveis para que sejam satisfeitas as proteções a ambos. A Figura 2.1 mostra essa compatibilização de proteção dos sistemas supracitados.

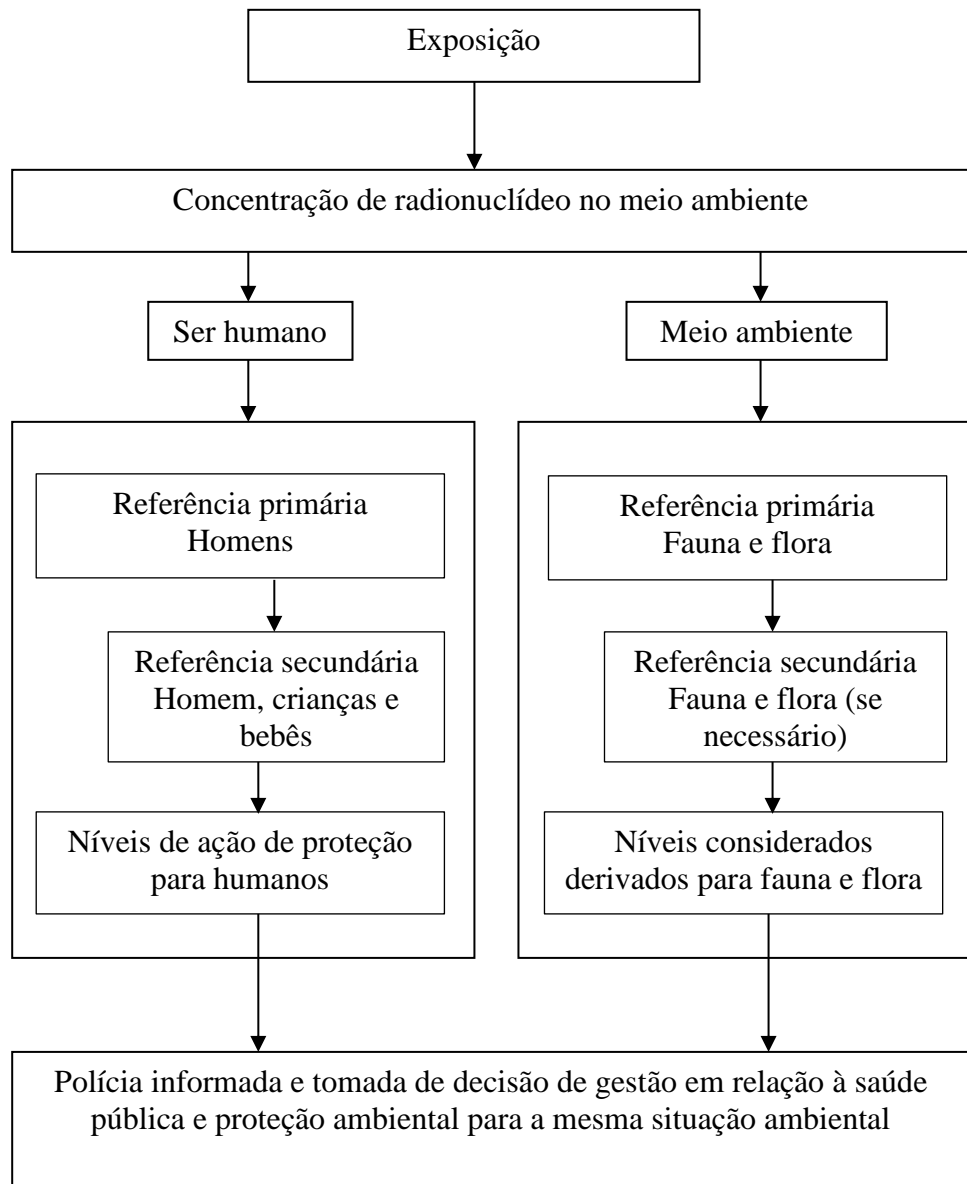


Figura 2.1 – Enfoques combinados baseados nas iniciativas atuais de atuação em área de risco radiológico.

Após a descoberta da radiatividade, uma série de eventos de origem nuclear ou radiológica foram registrados, sejam de forma intencional ou não. Os eventos de forma intencional, visam uma destruição em massa proveniente de uma explosão nuclear ou quando o material não apresenta uma massa crítica para proporcionar uma explosão nuclear, seu objetivo é liberar uma grande quantidade de radiação ou visa liberar uma quantidade de radiação capaz de causar bastante danos à população exposta, sendo esta última por meio de um Dispositivo de Dispersão Radiológico (RDD) (VAN MOORE 2004, TAKAHASHI 2018).

Visando guardar o registro das memórias dos incidentes ocorridos, a *International Atomic Energy Agency* (IAEA), criou um banco de dados registrando os incidentes bem como todo o tráfico de material radioativo e/ou nuclear identificado, o *Incident and Trafficking Database* (ITDB). Para efeito deste registro, são considerados dados pertinentes de registro, desde uma simples posse ilegal até tentativa de comercialização de material radioativo. São registrados também as perspectivas de utilização indevida deste material nuclear ou radioativo. As origens mais comuns das fontes furtadas ou perdidas são de natureza industrial ou medicinal (IAEA 2005).

Neste banco de dados, os incidentes são categorizados de forma numérica, desde 1 como potencialmente letal, até 5, menor potencial de risco, submetidos à categorização das fontes radioativas da IAEA, pelo documento RS–G–1.9 (IAEA 2005).

## 2.2. Grandezas dosimétricas

O conceito de grandeza dosimétrica está relacionado com a quantidade de radiação que um determinado material absorveu ou ficou de alguma forma submetido (ATTIX 1986). Com a evolução da utilização da radiação nos diversos campos, onde se destaca a área de saúde, tornou-se imperativo uma padronização das medidas das quantidades de radiação no processo de interação com a matéria, bem como uma relativização dos seus efeitos. Para tal, existem comissões internacionais que determinam esta padronização, cuidando da definição das grandezas dosimétricas e relação entre elas, bem como padronizando suas unidades, a Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (*International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU*) que define as grandezas físicas básicas e grandezas operacionais; e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection – ICRP*) que preocupa-se com o desenvolvimento da proteção radiológica e fazendo recomendações para os efeitos das interações que acontecem no organismo humano, indicando o risco dos efeitos da radiação ionizante.

No Brasil também existe uma comissão responsável pelos cumprimentos das normas relativas às atividades nucleares, a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Tendo em vista que as radiações não apresentam o mesmo grau de ionização e penetração, e dessa forma não causam o mesmo dano biológico, surge a necessidade de uma ponderação associada às grandezas dosimétricas, definida como dose equivalente. Devido o vasto espectro de variedades de grandezas limitantes, principalmente com o

envolvimento do risco, faz-se necessário o surgimento de outros conceitos mais refinados de doses equivalentes, ou seja, do órgão, efetiva, comprometida, etc (ATTIX 1986).

### 2.2.1. Dose absorvida (D)

Um dos efeitos da interação da radiação com a matéria é a transferência de energia que geralmente é feito de forma parcial devido as formas como a interação ocorre e a natureza do material. A relação entre a fração da energia absorvida e a massa de volume de material atingido é definida como Dose absorvida (D). Sua representação no sistema internacional de unidades é definida por J/kg recebendo a denominação gray (Gy). Sua representação matemática está definida na equação 2.3.

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad 2.3.$$

### 2.2.2. Dose equivalente (H<sub>T</sub>)

O conceito de dose equivalente surgiu da necessidade de se buscar uma equivalência entre as doses de diferentes radiações para produzir efeitos biológicos semelhantes. Para corrigir essa diferença foi introduzido um fator de ponderação, adimensional, multiplicador à dose absorvida média em determinado órgão ou tecido D<sub>T</sub>, representativo ao tipo e energia da radiação incidente ICRP 103(2007). A equação 2.4 apresenta o modelo matemático da dose equivalente.

$$H_T = D_T \cdot w_R \quad 2.4.$$

No Sistema Internacional a unidade de dose equivalente é o J/kg e, para que haja uma diferença dela para dose absorvida, foi criada uma unidade específica para ela, o sievert (Sv). A denominação antiga para a grandeza era o rem (*roentgen equivalent men*) e se deve considerar a relação de equivalência como 1 Sv equivalendo a 100 rem.

Os valores do fator de ponderação,  $w_R$ , foram estabelecidos para corrigir as diferenças entre as radiações e foram definidos pelos diferentes valores da transferência linear de energia conhecida por seu termo em inglês como LET (*Linear Energy Transfer*) e são considerados como representativos da qualidade da radiação, ponderado sobre

diferentes tecidos. A Tabela 2.1 mostra valores dos fatores de ponderação da radiação, estabelecidos na ICRP 103 (2007).

Tabela 2.1 - Valores dos fatores de ponderação da radiação ( $W_R$ ), utilizados neste trabalho, de acordo com a ICRP 103 (2007).

Tipo e faixa de energia <sup>[a]</sup>	Valores de $w_R$ <sup>[b]</sup>
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e muons, todas as energias <sup>[c]</sup>	1
Nêutrons <sup>[d]</sup> , 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 $\alpha$ , fragmentos de fissão, núcleos	20

Fonte: CNEN: Posição Regulatória 3.01/002, 2014.

[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.

[c] excluindo elétrons Auger, para os quais se aplicam considerações especiais de microdosimetria.

### 2.2.3. Dose efetiva (E)

Como os diferentes órgãos e tecidos apresentam fatores de peso ou qualidade diferentes surge a necessidade de estabelecer um conceito de dose efetiva ou dose equivalente efetiva ou dose equivalente de corpo inteiro como resultado do somatório dos produtos das doses equivalentes  $H_T$  por um fator de peso do tecido ou órgão. No Sistema Internacional de unidades a dose efetiva tem a mesma definição da dose equivalente, isto é, J/kg e também denominada sievert (Sv). A equação 2.5 define o modelo matemático para seu cálculo.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad 2.5.$$

A Tabela 2.2 mostra diversos fatores de peso do tecido estabelecidos na ICRP 103 (2007).

Tabela 2.2 - Alguns fatores de peso de órgãos e tecidos ( $W_T$ ) específicos para o cálculo de dose efetiva de acordo com a ICRP 103 (2007).

<b>Órgão ou Tecido</b>	<b><math>W_T</math></b>
Pele	0,01
Superfície óssea	0,01
Bexiga	0,04
Fígado	0,04
Gônadas	0,08
Mamas	0,12
Medula óssea	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12

#### 2.2.4. Dose Equivalente Comprometida (CDE)

A Dose Equivalente Comprometida é a dose observada em um órgão ou tecido que será recebida proveniente da ingestão de um material radioativo por um indivíduo observada num período de 50 anos após a ingestão do material radioativo.

#### 2.2.5. Dose Equivalente Efetiva Comprometida (CEDE)

A Dose Equivalente Efetiva Comprometida corresponde ao somatório dos produtos das Doses Equivalentes Comprometidas com os fatores de ponderação ( $W_T$ ) para cada órgão ou tecido que são irradiados.

#### 2.2.6. Dose Total Efetiva Equivalente (TEDE)

A Dose Total Efetiva Equivalente é definida pela soma das doses efetivas provenientes de exposições externas com a Dose Efetiva Equivalente Comprometida proveniente de exposições internas.

### 2.3. Dispositivo de Dispersão Radiológica (RDD)

Considera-se um RDD o artefato cuja natureza combina material radioativo com explosivos convencionais, e tendo em vista essa natureza é também conhecido como “bomba suja” (do inglês, *dirty bomb*). A Figura 2.2 mostra um esquema de RDD. As consequências físicas causadas por esses tipos de dispositivos são proporcionais ao material radioativo utilizado e, também, à potência e tipo de explosivo empregado, sendo normalmente o trinitrotolueno (TNT) o mais utilizado (HOMANN 2013).

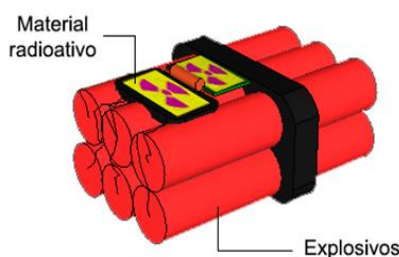


Figura 2.2 - Esquema de uma bomba suja (RDD).

Os objetivos da explosão de um RDD são as ameaças à vida e à propriedade humana e dentre 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 afetados de um RDD pode ser elevado em curto prazo (HARPER, MUSOLINO ET AL. 2007, URSO, KAISER ET AL. 2014, SINCLAIR AND FORTIN 2019).

### 2.4. Dispositivos Nucleares Improvisados (*Improvised Nuclear Devices – IND*)

Um Dispositivo Nuclear Improvisado é um artefato de origem obtida de forma irregular, podendo ser comprada, roubada ou até mesmo por meio de armas nucleares

obtidas de igual forma com a intenção de promover uma explosão nuclear. Seu objetivo é uma detonação nuclear por meio de uma junção de um material nuclear com explosivos. Seu efeito é o mesmo de uma explosão de armas nucleares e mesmo que este não seja alcançado, o efeito de sua dispersão radiológica já seria considerável para a sociedade.

As consequências de uma detonação de um IND vão além do excessivo calor, a liberação imediata de ondas de choques muito fortes e radiação que tem um poder letal em grandes distâncias. Um outro efeito é o da precipitação radioativa que também alcança grandes áreas (CHILCOTT, LARNER ET AL. 2018, HERRMANN 2018).

## 2.5. Comparações entre acidentes nucleares e terrorismo

Grande parte do planejamento de respostas a emergências radiológicas são feitos visando acidentes em instalações nucleares. Ações que envolvam RDD ou IND são geralmente inopinadas e o tempo e a forma de resposta não seguem o mesmo planejamento de um acidente.

As consequências da liberação de um IND são piores que a de um acidente em uma instalação nuclear principalmente devido às perdas causadas por incêndios e por explosões, que geralmente não são consequências de acidentes em instalações nucleares.

O fator surpresa e a duração da ação são outros diferenciais em relação aos acidentes. Nestes, há um tempo entre a identificação do problema e o acidente, o que não ocorre em um atentado envolvendo RDD ou IND.

A localização é outro diferencial. Normalmente instalações nucleares são construídas em locais de baixa densidade demográfica. No caso da liberação de um RDD ou IND, geralmente são escolhidos locais de elevada concentração populacional.

O tipo de liberação radioativa constitui também em um diferencial, haja vista que numa instalação nuclear são sabidas as características da planta, o que favorece ao planejamento de resposta.

Por fim, a liberação de um RDD ou IND, por se tratar de um atentado terrorista, tem seu local caracterizado como uma região de crime, que certamente trará impeditivos à ação imediata e necessária dos profissionais de pronto emprego de emergência para assuntos dessa natureza (CHILCOTT, LARNER ET AL. 2018, HERRMANN 2018).



## 2.6. Efeitos Biológicos das Radiações

Os primeiros efeitos biológicos produzidos no corpo humano proveniente da exposição à radiação ionizante, foram as primeiras exposições com raios X.

Diversos estudos, posteriormente, vieram tentar determinar esses efeitos em função de diversos parâmetros, tais como quantidade, forma e período de exposição à radiação, tendo como base os dados dos acidentes que ocorreram, tais como as vítimas de Hiroshima e Nagasaki ou até mesmo com experimentos realizados em amostras biológicas. A partir desses estudos identificou-se os efeitos de modificações que a radiação provocava nos átomos e moléculas em um organismo humano, tendo seus resultados apresentados consequências diferentes em função da exposição ter sido de única vez, fracionada ou periodicamente (ATTIX 1986). Verificou-se também que outros fatores são determinantes nos efeitos das radiações sobre o organismo humano, entre eles destacam-se a dose absorvida, a taxa de absorção (aguda ou crônica) e o tipo de tecido atingido (ANDRADE 2010).

Dentre os danos mais importantes da radiação sobre as células, os mais importantes estão ligados à molécula do DNA, pois as células afetadas podem simplesmente morrerem, tentarem se reproduzir ou conseguirem reparar a alteração. Esse reparo pode ser eficiente e a célula se restaurar completamente ou dar origem a mutações dela própria que poderia levar a um impedimento reprodutivo da célula ou alterações do seu material genético, trazendo consequências com o decorrer do tempo (ATTIX 1986).

Dessa forma, à medida que esses efeitos biológicos começam a alterar o funcionamento de um órgão ou do organismo humano devido a uma exposição de alta dose ou de maneira frequente, começam a surgir sintomas que mostram a incapacidade do organismo de recuperar essas alterações, surgindo então as doenças.

Não se pode determinar com precisão os valores de dose para exposição à radiação ionizante que conduza à situação segura. Há doses consideradas de baixo valor e que causam efeitos tóxicos (ANDRADE 2010). A Figura 2.3 evidencia várias vias de exposição e que podem ser planejadas ou não.



Figura 2.3 - Possíveis vias de exposição. Fonte (ANDRADE 2010)

## 2.7 Síndrome Aguda da Radiação (SAR)

A Síndrome Aguda da Radiação ou Síndrome da Irradiação Aguda consiste na manifestação das reações biológicas que o organismo humano apresenta como consequência de exposições a campos externos de radiação ou até mesmo por contaminação interna por radionuclídeos que podem alcançar valores bastante elevados de doses absorvidas nos tecidos ou órgãos. Sem que haja assistência médica, verifica-se que a dose de 3,5 a 4,0 Gy, considerada dose letal (DL), apresenta um percentual de 50% de letalidade num período de 60 dias. Há estudos que aproximam essa dose para o intervalo de 5 a 6 Gy sob cuidados clínicos intensos e apropriados (BROWNE ET AL, 1992).

Para tal, é importante uma primeira avaliação da dose absorvida visando determinar o tratamento subsequente a ser adotado. A Figura 2.4 mostra algumas síndromes associadas à Síndrome Aguda da Radiação.

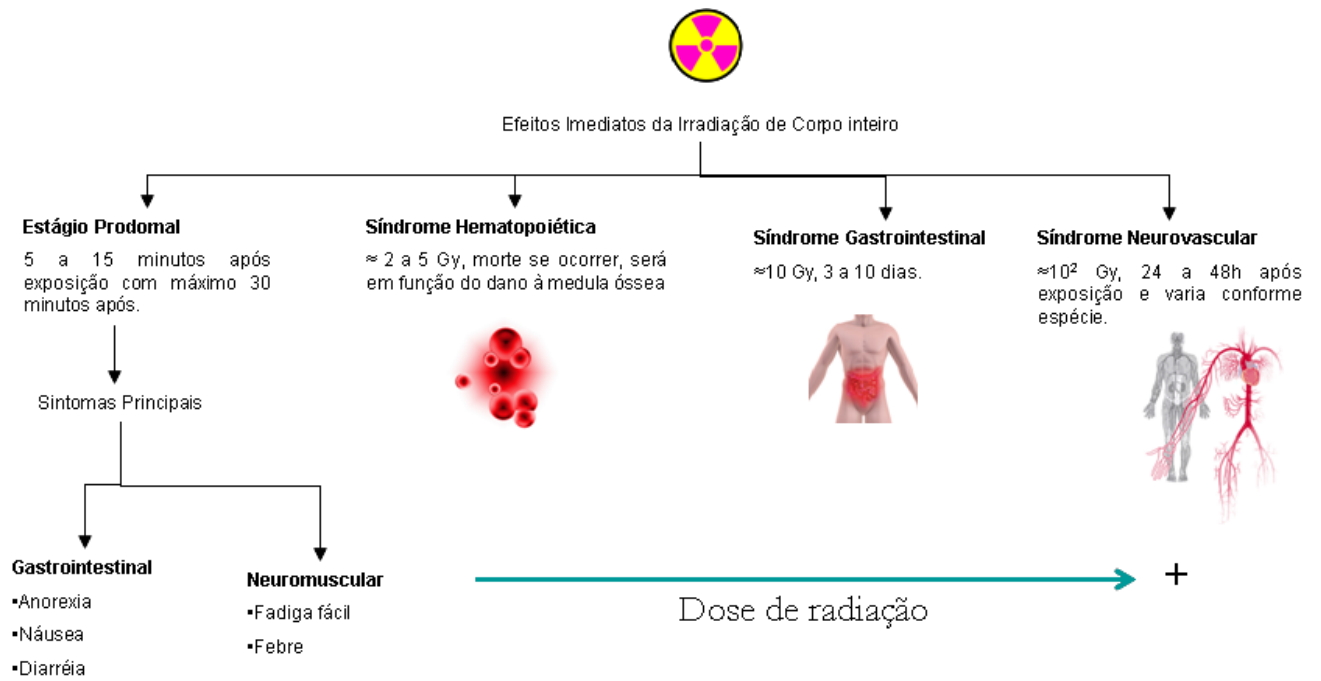


Figura 2.4 - Subsíndromes associadas à SAR. Fonte: (ANDRADE 2010)

As principais ações sobre os indivíduos diagnosticados com SAR são seu isolamento, bastante reposição de líquidos e eletrólitos, utilização de estimulante de proliferação celular de células da medula óssea e fundamentalmente bastante apoio psicológico ao indivíduo exposto (KOENIG, GOANS ET AL. 2005). A Tabela 2.3 mostra algumas síndromes associadas aos seus sintomas em função da dose absorvida.

Tabela 2.3 - Síndrome Aguda da Radiação.

FORMA	DOSE ABSORVIDA (Gy)	SINTOMAS
Infra-clínica	< 1	Ausência de sintomas, na maioria dos indivíduos
Reações leves generalizadas	1 a 2	Astenia, náuseas e vômitos de 3 a 6 horas após a exposição. Efeitos desaparecendo em 24 h.
Síndrome Hematopoiética Leve	2 a 4	Depressão da função medular (linfopenia, leucopenia, trombopenia, anemia). Máximo em 3 semanas após a exposição e voltando ao normal em 4 a 6 meses.
Síndrome Hematopoiética Grave	4 a 6	Depressão severa da função medular.
Síndrome do Sistema Gastrointestinal	6 a 7	Diarreia, vômitos, hemorragias
Síndrome Pulmonar	7 a 10	Insuficiência respiratória aguda
Síndrome do Sistema Nervoso Central	> 10	Coma e morte. Horas após a exposição.

Fonte: (TAUHATA 2013)

A Tabela 2.4 identifica de forma temporal, as síndromes resultantes da exposição aguda e de corpo inteiro à radiação.

Tabela 2.4 - Sintomas de doença resultantes da exposição aguda à radiação ionizante, em função do tempo.

TEMPO DE MANIFESTAÇÃO (SEMANAS)	SOBREVIVÊNCIA		
	PROVÁVEL 1 – 3 Gy	POSSÍVEL 4 – 7 Gy	IMPROVÁVEL > 8 Gy
1	Fase latente, nenhum sintoma definido	Náusea, vômito	Náusea, vômito, diarreia, garganta inflamada, úlcera, febre, emagrecimento rápido, morte.
2		Depilação, perda de apetite, indisposição, garganta dolorida, diarreia, emagrecimento, morte.	
3	Depilação, perda de apetite, indisposição		
4	Garganta dolorida, diarreia, emagrecimento moderado.		

Fonte: (TAUHATA 2013).

A Figura 2.5 apresenta um resumo das principais ações decorrentes da Síndrome Aguda da Radiação (SAR).

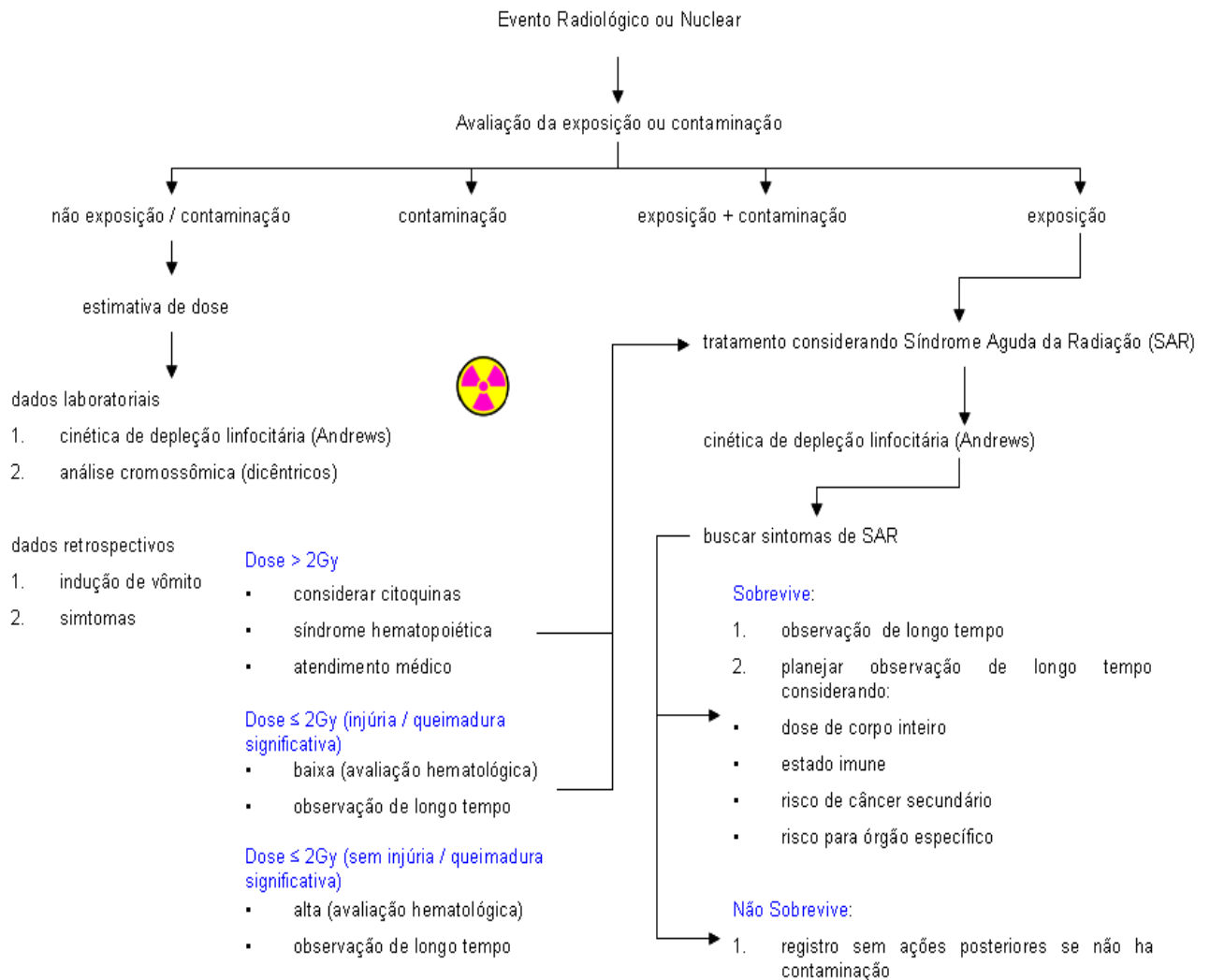


Figura 2.5 - Quadro resumo dos principais eventos decorrentes da SAR. Fonte: (ANDRADE 2010)

Para a realização de estudos desta natureza que incluem novas fontes e sua contribuição na degradação da qualidade do ar em sua área de influência, utiliza-se o recurso da modelagem matemática, que simula concentrações de poluentes num ponto qualquer sobre o terreno. Os modelos matemáticos, por serem simplificações dos processos reais ocorridos na atmosfera sempre possuem limitações. Também, a forma de liberação do material radioativo na atmosfera é relevante. Vários são os modelos para liberação atmosférica de material contaminante e cada uma delas oferece um nível diferente de observação. De forma geral se pode artificialmente classificar as liberações

segundo as perspectivas Euleriana e Lagrangeana, sendo a utilização de uma determinada classe de modelo dependente da complexidade do problema. Nos modelos Eulerianos, a dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial para conservação de massa a qual é resolvida em um domínio fixo no espaço-tempo (LAGZI, KARMAN ET AL. 2004). Já no modelo Lagrangeano, a trajetória de cada partícula representa uma realização estatística em um campo turbulento caracterizado por certas condições iniciais e vínculos físicos (KIM, SONG ET AL. 2008, RAKESH, VENKATESAN ET AL. 2015). A diferença básica entre as abordagens é que o sistema Euleriano é fixo em relação à Terra, enquanto o Lagrangeano segue o movimento médio do fluido no meio. Os métodos utilizados para a classificação de modelos de dispersão podem ser elencados como:

- *Gaussianos*: são os mais utilizados para estimativas de impacto de fontes de poluentes primários;
- *Numéricos*: são normalmente mais apropriados que os modelos gaussianos para áreas urbanas que evoluem reações química na atmosfera.
- *Estatísticos*: são normalmente empregados em situações em que não há um completo entendimento dos processos físicos e químicos envolvidos.
- *Físicos*: envolvem o uso de réplicas reduzidas de áreas urbanas ou de túneis de vento.

Para este trabalho as simulações serão conservativas e, desta forma, o modelo gaussiano é adequado (LEROY, MARO ET AL. 2010). Este modelo é aplicado na maioria dos modelos de poluição atmosférica e descreve um campo de concentração tridimensional gerado pontualmente em condições de emissão e meteorológicas estacionárias (HOMANN 2013). Descreve matematicamente os processos de transporte e difusão turbulenta que ocorrem na atmosfera e permitem calcular, em qualquer ponto do espaço tridimensional, o valor da concentração de poluente em função da quantidade de produto emitido (instantaneamente - *puff* ou por liberação contínua), da altura efetiva da liberação, da velocidade do vento e da classe de estabilidade atmosférica, neste trabalho as classes de Pasquill-Gifford (PASQUILL 1961). O software HotSpot efetua seus cálculos utilizando modelos gaussianos para a liberação atmosférica simulada.

## 2.8. HotSpot - *HEALTH PHYSICS CODES*

O Código HotSpot é fornecido pelo *National Atmospheric Release Advisory Center*, do *Lawrence Livermore National Laboratory*, cujas instalações ficam na Califórnia, Estados Unidos da América. Sua finalidade principal é fornecer uma situação aproximada dos efeitos da radiação ionizante na atmosfera, quando materiais radioativos são liberados, via meios pré-determinados no próprio código. Sua aplicação permite de forma bastante rápida, um assessoramento ao poder decisório por meio de respostas a equipes técnicas e de planejamento em casos de emergência, utilizando-se de ferramentas computacionais avaliativas do cenário existente. Pode também ter sua utilização em instalações que manuseiem material radiativo, por meio de uma análise de segurança. É uma ferramenta bastante importante em incidentes radiológicos e/ou nucleares, pois permite com rapidez uma avaliação do impacto causado. Em apoio a esta pesquisa serve como elemento de avaliação dos potenciais desdobramentos das ações que tenham um RDD como elemento gerador da liberação do material radioativo (HOMANN 2013).

São considerados no código, vários modelos de dispersão atmosférica, para efeito desta pesquisa serão considerados *general explosion*, por ser uma simulação originada pela explosão de um RDD. Será também adotada a contaminação por *ground shine*, pois os outros tipos pressupõem inalação, resuspensão, e ingestão, assim serão considerados os efeitos da radiação próximos à superfície. Quanto à estabilidade atmosférica, o HotSpot considera duas opções, os parâmetros referentes ao sol ou quanto à estabilidade climática, divididas em categorias de Pasquill-Gifford (PASQUILL 1961, HOMANN 2013). Para efeito desse estudo, as classes de Pasquill serão levadas em consideração. Há ainda outros parâmetros referentes à meteorologia que o HotSpot leva em consideração para efeito das suas simulações como, a velocidade e direção do vento.

A simulação oferecida pelo código HotSpot é feita por um programa conservativo em relação à dose de radiação, seguindo modelos gaussianos para o cálculo da dispersão de radionuclídeos no ambiente (HOMANN 2013). O HotSpot classifica as camadas das superfícies atmosféricas diferentemente dos meteorologistas, que o fazem em instável, neutra e estável. O código permite que essa classificação seja selecionada diretamente pelo usuário em função do fator de insolação solar e da velocidade do vento a uma altura de 2 m em relação ao solo. O HotSpot apresenta uma classificação em seis níveis, de A até F, ditas classes de Pasquill-Gifford, onde a classe A é extremamente instável, a classe B é moderadamente instável, a classe C é levemente instável, a classe D é neutra, a classe

E levemente estável e a classe F é moderadamente estável (PASQUILL 1961, HOMANN 2013).

O código HotSpot, coloca sua origem de coordenadas no nível do solo, abaixo do ponto de liberação do radionuclídeo ( $x = 0, y = 0, z = 0$ ), sendo o eixo x o eixo da direção do vento e o eixo y é o eixo da direção transversal ao eixo do vento, e os dois eixos no plano horizontal. O eixo z estende-se verticalmente a partir do solo. Uma pluma viaja ao longo, ou paralela ao eixo do vento. A Figura 2.6 mostra essas coordenadas.

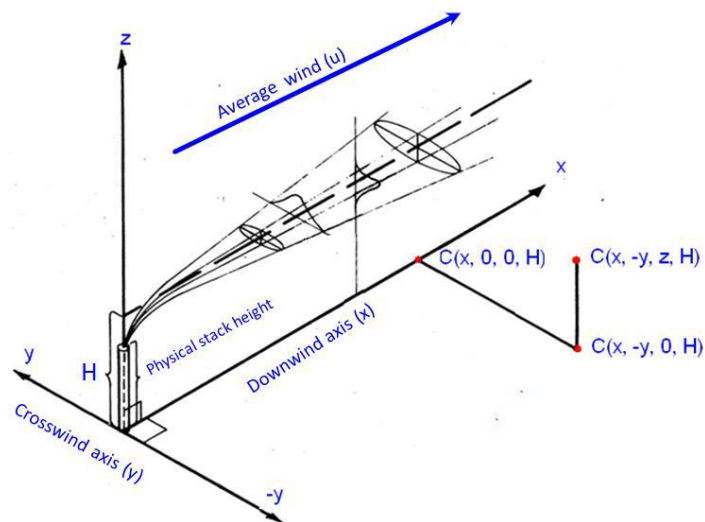


Figura 2.6 - Coordenadas utilizadas no código HotSpot (HOMANN, 2014)

### 2.8.1 Distribuição Gaussiana

Tendo em vista a natureza contínua da radiação, quando levada em consideração sua distribuição, a distribuição gaussiana é a mais importante distribuição a ser considerada, uma vez que mesmo que os dados não sejam distribuídos por uma normal, suas médias irão convergir para uma distribuição normal, principalmente quando a quantidade de dados é aumentada. A função densidade de probabilidade é definida por (HOMANN 2013).

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad 2.6$$

onde:



$x$  = Variável aleatória;

$\mu$  = Média do conjunto de variáveis;

$\sigma$  = Desvio-padrão do conjunto de variáveis.

## 2.8.2 Distribuição Gaussiana no código HotSpot

A distribuição gaussiana é o modelo utilizado para calcular valores iniciais de dispersão atmosférica (HOMANN 2013, JEONG, PARK ET AL. 2013), por apresentar resultados bastante representativos quando comparados aos dados experimentais (SAINT YVES, CABRAL ET AL. 2012) e por esse motivo é aceito pela Agência de Proteção Ambiental (EPA). Seu modelo em função das distâncias relativas à velocidade do vento, do eixo vertical e da altura efetiva de lançamento no HotSpot visando determinar a concentração atmosférica em qualquer ponto do espaço é dada por:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left( e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right) e^{-\frac{\lambda x}{u}} \cdot DF(x) \quad 2.7$$

onde:

$C$  é o tempo integrado da concentração atmosférica (Ci.s)/(m<sup>3</sup>);

$Q$  é a atividade da fonte (Ci);

$H$  é a altura efetiva de lançamento (m);

$\lambda$  é a constante de decaimento radioativo (s<sup>-1</sup>);

$x$  é a distância percorrida na direção do vento (m);

$y$  é a distância perpendicular à direção do vento (m);

$z$  é a distância do eixo vertical (m);

$\sigma_y$  é o desvio padrão da distribuição de concentração integrada na direção perpendicular à do vento (m);

$\sigma_z$  é o desvio padrão da distribuição de concentração integrada na direção vertical (m);

$u$  é a velocidade média do vento na altura de liberação efetiva do material (m/s);

$L$  a altura da camada de inversão (m);

$DF(x)$  o fator de depleção da pluma.

O algoritmo do HotSpot referencia suas coordenadas no nível do solo, utilizando as coordenadas de liberação do radionuclídeo em (0, 0, 0). Assim, o modelo matemático para a DF(x), utilizada pelo HotSpot é:

$$DF(x) = \left( e^{\int_0^x \left( \frac{1}{\sigma_z e^{\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2}} \right) dx} \right)^{\frac{v}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad 2.8$$

onde:

v é a velocidade de deposição (m/s) do material radioativo;

$\sigma_z(x)$  é o desvio padrão da distribuição de concentração de ar na direção vertical (eixo z) para qualquer terreno padrão.

O código HotSpot 3.0 permite calcular a TEDE utilizando os coeficientes de dose a partir do documento *Federal Guidance Report* (FGR) 11, 12 e 13. O FGR 11 fornece os coeficientes de dose para inalação aguda de radionuclídeos baseando-se nos modelos dosimétricos da ICRP 30. O FGR 12 fornece os coeficientes de dose para exposição externa a radionuclídeos, seja em ar, água ou solo. O FGR 13, objeto desta pesquisa, fornece coeficientes de dose usando a ICRP 66 bem como as metodologias da ICRP 60/70 (HOMANN 2013).

### 2.8.3 Dispersão Radiológica Ambiental

O problema principal na medição das doses em uma avaliação radiológica ambiental reside na determinação dessas doses, seja para um indivíduo ou uma sociedade. Isto ocorre devido às radiações liberadas pelos radionuclídeos dispersos no ambiente. Em geral, a determinação dessa dose depende de alguns fatores, entre eles:

1. A quantidade expressa em termos de concentração dos radionuclídeos em função da posição do indivíduo ou população expostos e do tempo de exposição;
2. Do valor da energia emitida por cada radionuclídeo, bem como a intensidade de suas radiações de interesse;

3. Da forma como é transmitida as radiações, levando-se em consideração os diferentes meios, estrutura urbana, entre a fonte e os receptores;
4. Da forma como os tecidos do corpo dos indivíduos expostos irá transmitir essa radiação incidente, que determinará as doses nos órgãos desse corpo. Ressalta-se que o cálculo dessas doses geralmente é feito em um processo de simulações de Monte Carlo (TILL 1983).

A grande dificuldade na determinação dessas doses envolve a concentração dos radionuclídeos dispersos no meio ambiente, tendo em vista que devido a essa dispersão a taxa de dose é sempre proporcional a concentração instantânea, devendo-se portanto ser levado em consideração a taxa e a forma com que é feita essa liberação dos radionuclídeos, o movimento dessa dispersão no ambiente e o decaimento radioativo do radionuclídeo bem como seus derivados radioativos (TILL 1983).

A estimativa da dose em um meio ambiente, depende fundamentalmente das concentrações dos radionuclídeos em função do tempo e da posição em relação ao ponto de liberação da fonte. Para tal, alguns parâmetros são verificados e entre eles destacam-se:

1. A forma da exposição a ser considerada, no presente estudo foi levada em consideração o *ground shine*, e
2. O cálculo da dose sobre o indivíduo, no presente estudo foi levada em consideração a taxa de dose absorvida em função da posição;

Esses parâmetros foram adotados para validação da metodologia do estudo.

#### 2.8.4 Estabilidade Atmosférica

Quanto à comparação com o deslocamento das camadas de ar no sentido vertical, os estados gerais da camada superficial atmosférica foram classificadas por Pasquill em instável, neutra e estável (PASQUILL, 1961).

O código HotSpot apresenta a velocidade do vento e a estabilidade atmosférica local como variáveis. A estabilidade atmosférica é classificada por Pasquill (PASQUILL, 1961) em 6 classes de estabilidade de A até F, variando com as condições climáticas, velocidade do vento e hora do dia, dependendo da classe de estabilidade escolhida os

efeitos podem ser maximizados. Gifford sugeriu valores modificados de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para uso com as categorias originais de estabilidade de Pasquill (GIFFORD, 1976), resultando a notação de classes de estabilidade Pasquill-Gifford.

O desvio-padrão da propagação em x,  $\sigma_x$  (propagação da pluma a medida que x aumenta) também foi relacionado com  $\sigma_\theta$  que é o desvio padrão da inclinação do vento definindo as categorias de estabilidade atmosférica de Pasquill (notação Pasquill-Gifford): (a) A: Extremamente instável ( $\sigma_\theta = 25^\circ$ ), (b) B: Moderadamente instável ( $\sigma_\theta = 20^\circ$ ), (c) C: Ligeiramente instável ( $\sigma_\theta = 15^\circ$ ), (d) D: Neutro ( $\sigma_\theta = 10^\circ$ ), (e) E: Ligeiramente estável ( $\sigma_\theta = 5^\circ$ ), e (f) F: moderadamente estável ( $\sigma_\theta = 2,5^\circ$ ). Este sistema de classificação de estabilidade atmosférica é recomendado pela *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) (HOMANN, 2014).

O HotSpot seleciona automaticamente a classe de estabilidade atmosférica em função das entradas de velocidade do vento e quantidade de insolação a 2 m de altura. Esta classificação pode ser observada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Condições meteorológicas para definir a classificação da estabilidade atmosférica de categorias de A a F utilizadas no HotSpot (HOMANN, 2014).

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

Para efeito de uma liberação elevada, o ponto de máxima concentração irá depender da classe de estabilidade escolhida. Materiais com velocidade de deposição nula e ponto de liberação no solo ou próximo dele, sua concentração máxima estará associada a classe de estabilidade mais estável, F. Dessa forma se a velocidade de deposição for não nula, a situação para grandes distâncias a favor do vento não estará associada à classe de estabilidade F, como consequência aos efeitos da depleção da pluma, ou seja, a concentração da pluma reduzirá o seu valor à medida que velocidade seja mais maior com o aumento da classe de estabilidade (A-F) e o aumento da velocidade de deposição. Exemplificando, em um ponto, a classe de estabilidade E pode resultar em uma

concentração local mais alta do que a classe F devido à menor depleção de pluma associada à estabilidade E (HOMANN, 2014).

Após a classe de estabilidade atmosférica ser determinada, o código HotSpot usa as equações apresentadas nas Tabelas 2.6 e 2.7 para estimar o desvio-padrão de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  em dois tipos de terreno: (a) padrão e (b) cidade. Para o terreno urbano há um aumento da dispersão de plumas em estruturas com características de retenção de calor de superfícies, por exemplo asfalto e concreto, apresentando valores de concentrações bem mais baixos que o fator padrão, como consequência ao aumento da dispersão em grandes estruturas e materiais urbanos (HOMANN, 2014).

Pasquill desenvolveu o modelo mais utilizado na estimativa de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  e o que melhor se adapta às situações apresentadas pelo código HotSpot é o modelo de Briggs. Briggs relacionou as curvas de Pasquill com curvas obtidas dos dados observados no *National Laboratory* e *Tennessee Valley Authority*, acrescentando conceitos teóricos sobre os limites assintóticos das fórmulas visando um conjunto amplamente utilizado de equações para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Este modelo que calcula o coeficiente de dispersão vertical em função da distância  $x$ , apresenta um valor diferente para cada classe de estabilidade atmosférica e possibilita o cálculo para áreas urbanas ou padrão (HOMANN, 2014).

Tabela 2.6 - Coeficientes de difusão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para terreno padrão (HOMANN, 2014).

Classes de Estabilidade	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A	$\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	0,20x
B	$\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	0,12x
C	$\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,080x}{\sqrt{1 + 0,0002x}}$
D	$\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,060x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$
E	$\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,030x}{1 + 0,0003x}$
F	$\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,016x}{1 + 0,0003x}$

Tabela 2.7 - Coeficientes de difusão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para terreno urbano (HOMANN, 2014).

Classes de Estabilidade	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A e B	$\frac{0,32x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$0,24x\sqrt{1 + 0,001x}$
C	$\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$0,20x$
D	$\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$\frac{0,14x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$
E e F	$\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$

Visando uma comparação, considerando as condições mais extremas, utilizou-se simulação a aproximação para o terreno padrão, nas Figuras 2.7 e 2.8 pode-se verificar representações gráficas para o modelo de Briggs (HOMANN, 2014):

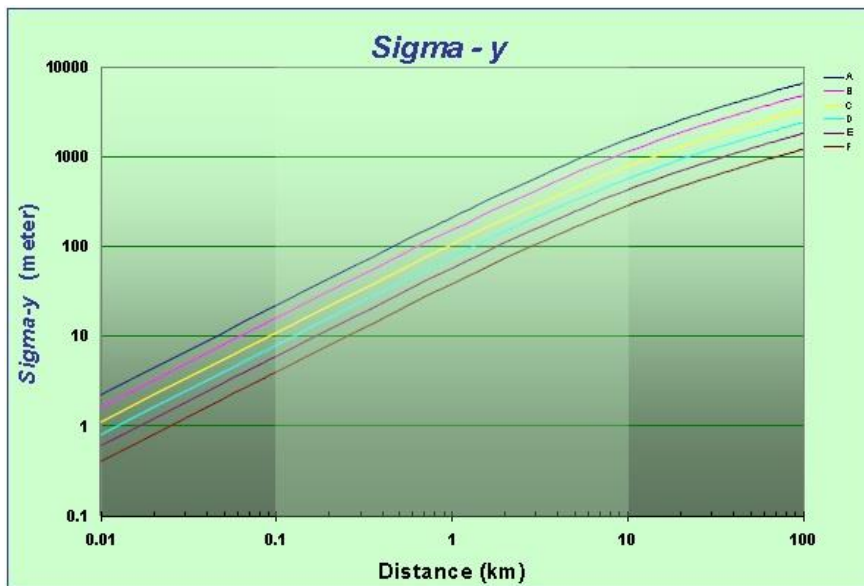


Figura 2.7 - Representação gráfica das equações para  $\sigma_y$  em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão (HOMANN, 2014)

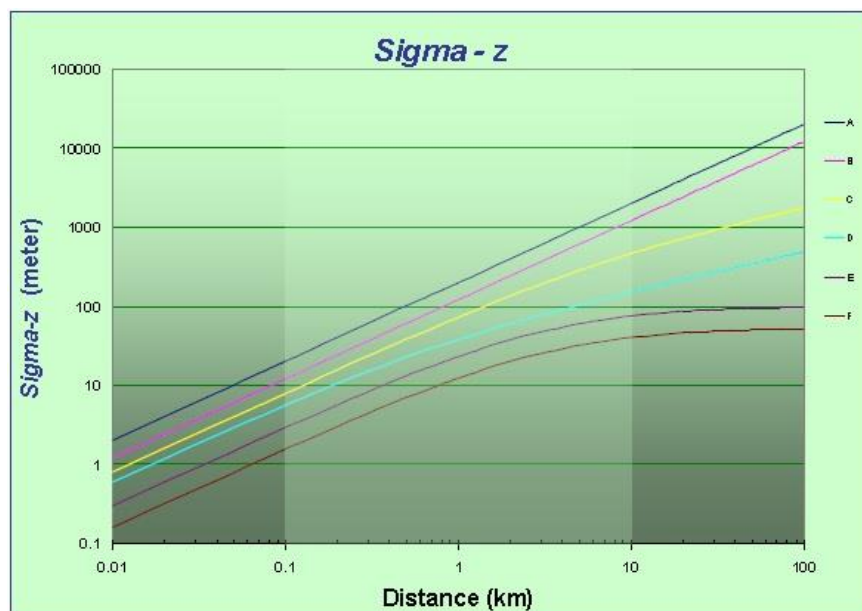


Figura 2.8 - Representação gráfica das equações para  $\sigma_z$  em função da distância  $x$  para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão (HOMANN, 2014)

#### 2.8.5 Monitoração radiológica urbana para RDD e IND

A exposição humana à radiação é controversa e expõe limites de segurança ou efetividade não precisos e com alta variabilidade individual. Seja na seara da Radioecologia ou das aplicações industriais ou médicas conhecer e determinar campos de radiação é de fundamental importância para se tentar modelar consequências que resultam em assessoramento para a decisão sobre o cenário. Por este motivo, considerando-se liberações de material radioativo para o meio ambiente externo (liberações atmosféricas) é importante se definir um método de monitoramento da radiação ambiental. Para o caso deste trabalho, o interesse recai nos perfis de dose de radiação próximo ao solo devido ao acúmulo de material liberado e depositado por processos secos, referido neste trabalho como *groundshine*.

No caso de liberação atmosférica de material radiativo por via de RDD, dois efeitos principais podem ser verificados como consequência, o primeiro é a perda de recursos humanos e materiais nas zonas próximas ao evento devido ao efeito de destruição provocado por desdobramentos mecânicos da explosão sobre a região afetada, que embora seja esperada como pequena área, é um fator a ser levado em consideração, e o segundo são os efeitos comportamentais decorrentes principalmente dos agentes ligados à área econômica e que estão ligados a uma sensível aumento da percepção de risco

radiológico, além das consequências radiológicas diretas que podem levar à interdição de áreas e aumento da incidência de morbidades na população afetada e que podem se configurar fatores incapacitantes sociais. Embora a detonação de um RDD tenha consequências imediatas limitadas no campo material, efeitos mais sofisticados envolvendo variáveis temporais do risco podem indicar perdas acentuadas (GIESECKE, BURNS ET AL. 2012).

Segundo Giesecke e colaboradores (2012), sentimentos de incerteza e pavor são os principais problemas decorrentes da detonação de um RDD em uma região. Quaisquer ações no sentido de atenuar esses fatores, terão consequências bastante produtivas para a sociedade e a modelagem de consequências pode contribuir para o conhecimento mais profundo do cenário pós detonação. É importante ressaltar que qualquer dano proveniente da área nuclear via de regra provoca ambiente de incertezas e, portanto, consequências sociais, políticas e econômicas podem ser exageradas (FLORIG AND FISCHHOFF 2007).

Desta forma, a detonação de um RDD tem um potencial para efetivamente causar perdas cujo dano pode ter alcance tanto sobre a população tanto numa perspectiva física quanto econômica. Estudos mostram que, desses, as perdas decorrentes à interrupção da atividade econômica é a mais significativa e qualquer ação de pesquisa que vise atenuar as consequências desse tipo de ataque, deve prever assessoramento ao poder decisório sobre o comportamento desse fator (GIESECKE, BURNS ET AL. 2012).



# Capítulo 3

## Metodologia

A metodologia proposta nesta tese se baseia em informações consideradas relevantes e de interesse para o apoio à decisão em um evento radiológico caracterizado pela detonação de um IND ou RDD sobre uma área densamente ocupada. Estas informações, que são denominadas neste trabalho como “Operadores Ambientais de Decisão (OAD)”, são resultado da aplicação da metodologia e foram determinadas exclusivamente para as finalidades deste estudo, guiando-se pela experiência da equipe envolvida e pela capacidade de prover resultados que a metodologia oferece. O objetivo principal é avaliar os impactos positivos sobre o processo de decisão com referência aos dez OAD criados, tomando-se por base as orientações EPA-PAG (*Planning Guidance for Protection and Recovery Following Radiological Dispersal Device (RDD) and Improvised Nuclear Device (IND) Incidents*, 2004). É interessante perceber que estes operadores são destinados à tomada de decisão e não podem ser confundidos com as variáveis iniciais que foram utilizadas como dados de entrada para o código HotSpot, que têm a finalidade de construir o cenário simulado. Assim, os OAD são, na verdade, resultado da aplicação da metodologia. A metodologia apresenta como fatores limitantes o estudo de uma liberação atmosférica (abordagem gaussiana) de material radioativo que se deposita sobre uma zona urbana habitada, a exclusão de consequências decorrentes de contaminações por interação com águas (oceanos, rios, lagos, reservatórios dentre outros possíveis), os possíveis efeitos das rugosidades típicas do solo urbano e fenômenos de convecção relacionados às ilhas de calor normalmente presentes em centros urbanos e materiais radioativos com meia-vida da mesma ordem de grandeza do tempo de exposição do código HotSpot (4 dias). A seguir são apresentados cada OAD aplicados ao estudo.

### 1) Taxa de dose localizada ( $\dot{D}$ ) em uma posição genérica no cenário (DRL)

A taxa de dose ( $\dot{D}$ ), DRL, é uma informação central, que permite, por integração no tempo, conhecer as doses locais para um ponto do cenário. Neste trabalho, são consideradas as doses ambientais devido à exposição à radiação gama emitida pelo elemento cério-137 (Cs-137). Esta exposição se dá de corpo inteiro sendo proveniente de contaminação superficial do solo, neste estudo denominada *groundshine*. Na metodologia

proposta, essa taxa depende da posição sugerida pelo usuário para determinar as condições da simulação, por área, por classe de Pasquill-Gifford e levando-se em consideração a proteção oferecida pela blindagem.

## 2) Classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford (PG)

Os impactos das condições atmosféricas são de reconhecida relevância para se estimar potenciais efeitos da dispersão de materiais contaminantes sobre uma população alvo (Homann 2013). Neste trabalho, as estimativas de eventos e condições futuras do sistema foram realizadas levando-se em consideração as classes de estabilidade atmosférica PG, definidas na seção de fundamentação teórica. Alterações nestas classes, cuja dependência maior se dá com as velocidades do vento de superfície, podem ter impactos importantes nas distribuições do contaminante pela superfície do solo e, por consequência, na taxa de dose local de radiação. Na metodologia apresentada há a previsão de 6 (seis) classes definidas na utilização do código HotSpot. Em função da posição escolhida, a metodologia define a zona em que a posição escolhida se encontra dentro da classe, para o cenário descrito no HotSpot. Cabe ressaltar que essas mesmas classes são utilizadas no EPA\_PAG manual (2017), definidas nesse manual como categorias de classes de estabilidade onde a turbulência atmosférica são classificadas em seis classes de estabilidade denominadas A, B, C, D, E e F, sendo a classe A a mais instável ou mais turbulência e a classe F a mais estável ou menos turbulenta (Pasquill 1961).

## 3) Estrutura urbana de blindagem (EUB)

As EUB são operadores de relevância tanto para estudos de dispersão em 2D quanto em 3D. São operadores que oferecem alterações nos padrões de blindagem para a população potencialmente afetada e, se levados em consideração, podem ter impacto significativo sobre as demandas logísticas, pois podem alterar protocolos de priorização de evacuação e abrigagem pela influência sobre o risco radiológico que podem apresentar.

## 4) Localização individual dentro das zonas de contaminação (plumas) (LIP)

A LIP é fundamental para se determinar níveis de risco e a avaliação deste OAD pode ser decisivo para que se tracem estratégias de resposta que sejam atualizadas ou atualizáveis em tempo real, caso a informação a respeito das DRL sejam disponíveis em tempo real. É importante para tal a permanente atualização dos dados pelo código HotSpot para que sejam gerados arquivos tipo TXT que alimentarão o modelo proposto.

#### 5) Estimativa do tamanho da população potencialmente afetada (PPA)

O tamanho da PPA pode ser estimado pela relação entre o tamanho da área afetada e a densidade demográfica média local. Este OAD permite avaliar impactos sobre a população potencialmente afetada com vistas a gerenciar crises e apoiar tanto os esforços de evacuação e abrigagem quanto estudos em uma abordagem de acompanhamento futuro em uma perspectiva epidemiológica. A área afetada por uma pluma é calculada pelo código HotSpot e dessa forma a metodologia pode estimar a população potencialmente afetada tendo o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra. Para esta estimativa a densidade demográfica é considerada constante (premissa conservadora) e o resultado é o produto entre esta densidade e a área calculada pelo código HotSpot.

Esse parâmetro é de fundamental importância pois poderá servir de suporte à tomada de decisão. O EPA-PAG *manual* (2017) chega definir guias de ação de proteção (PAG) de realocação que proporcionará proteção adequada para o público em geral, nessa caracterização incluem-se crianças, representantes de grupos de alto risco. O manual define estratégias de verificação de doses, para direcionamento da sociedade e que valida dessa forma a proposta da metodologia por sua definição. É definido também no manual que deixa de ser uma ação prática a movimentação dos habitantes quando a dose alcançada for inferior a 10% da dose inicial, isso ocorre devido a dose ficar reduzida sob uma área muito grande, ocasionando uma ação logística desnecessária principalmente devido aos incrementos econômicos devidos.

#### 6) Estimativa do custo de detrimento (CD - US\$)

O operador CD é consequência direta da aplicação dos operadores DRL e PPA. A avaliação do operador CD é relevante para se entender e oferecer aos tomadores de decisão uma estimativa das dimensões dos impactos econômicos futuros e sobre a saúde

pública, que tem normalmente significativa influência sobre demandas políticas. Cabe ressaltar que no modelo proposto este valor é calculado, automaticamente, em função da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra e da área ocupada na zona da classe escolhida, mostrada no arquivo tipo TXT da simulação do cenário no HotSpot, levado em consideração o valor de US\$ 10.000,00/pessoa.Sv, que é o valor sugerido pela Agência Internacional de Energia Atômica, adotado no cenário brasileiro

#### 7) Tempo ótimo de resposta (TOR)

O operador TOR é definido para cada cenário em função das alterações nas variáveis que se apresentem, como por exemplo, alterações nas classes PG. Este operador pode ser considerado um guia para os tomadores de decisão quando no exercício de definir prioridades. O TOR é um fator de medida para empenho das forças de resposta a cada mudança no cenário em relação ao tempo inicial  $t_0$ , sendo um operador de característica dinâmica, assim como todos os demais.

#### 8) Tempo limite de dose (TLD - função das classes de Pasquill-Gifford)

O operador TLD é um indicador do tempo necessário para um limite de dose de interesse ser atingido em um determinado local e em uma condição do cenário. Possui, assim, significativa relevância para a tomada de decisão pois pode ser parametrizado por documentação técnica oficial com força de legislação, como as normas que determinam limites de exposição ocupacional. Na metodologia, o TLD é determinado em função da dose escolhida inicialmente, e nada impede que esta dose seja colocada como o limite de dose de interesse a ser atingida na posição de estudo no cenário.

#### 9) Áreas de pluma (AP)

O operador AP é aplicado para se acompanhar a evolução das plumas de contaminação em função do tempo e sobretudo em função de modificações no cenário. É esperado que este operador tenha relevância no apoio à tomada de decisão pois permite avaliar a evolução do cenário em uma perspectiva geográfica, o que pode ser de interesse para se decidir tanto sobre a classificação de áreas como a priorização de atendimento. Na metodologia, essa área é obtida pelo código HotSpot, em seu arquivo tipo TXT, e essa

área é um parâmetro fundamental também para a determinação da População Potencialmente Afetada (PPA), junto à informação da densidade demográfica obtida para a região de interesse.

10) Distância máxima de dose (DMD - tamanho do eixo maior da pluma elíptica de contaminação)

O operador DMD é complementar ao operador AP e tem sua relevância na determinação de rotas para atendimento em uma área de interesse dentro da pluma de interesse. Na metodologia, esse parâmetro é bastante importante por delimitar os limites das classes dentro da área da pluma.

Para aplicação da metodologia proposta neste trabalho foi montada uma rotina que é descrita a seguir.

1. Devem ser introduzidos todos os valores provenientes do cenário e, inicialmente, roda-se o código na classe A de Pasquill-Gifford e sem colocar os receptores, para tal basta desmarcar todos os receptores mesmo que eles apresentem valor numérico por *default*. Este procedimento é apresentado na Figura 3.1.

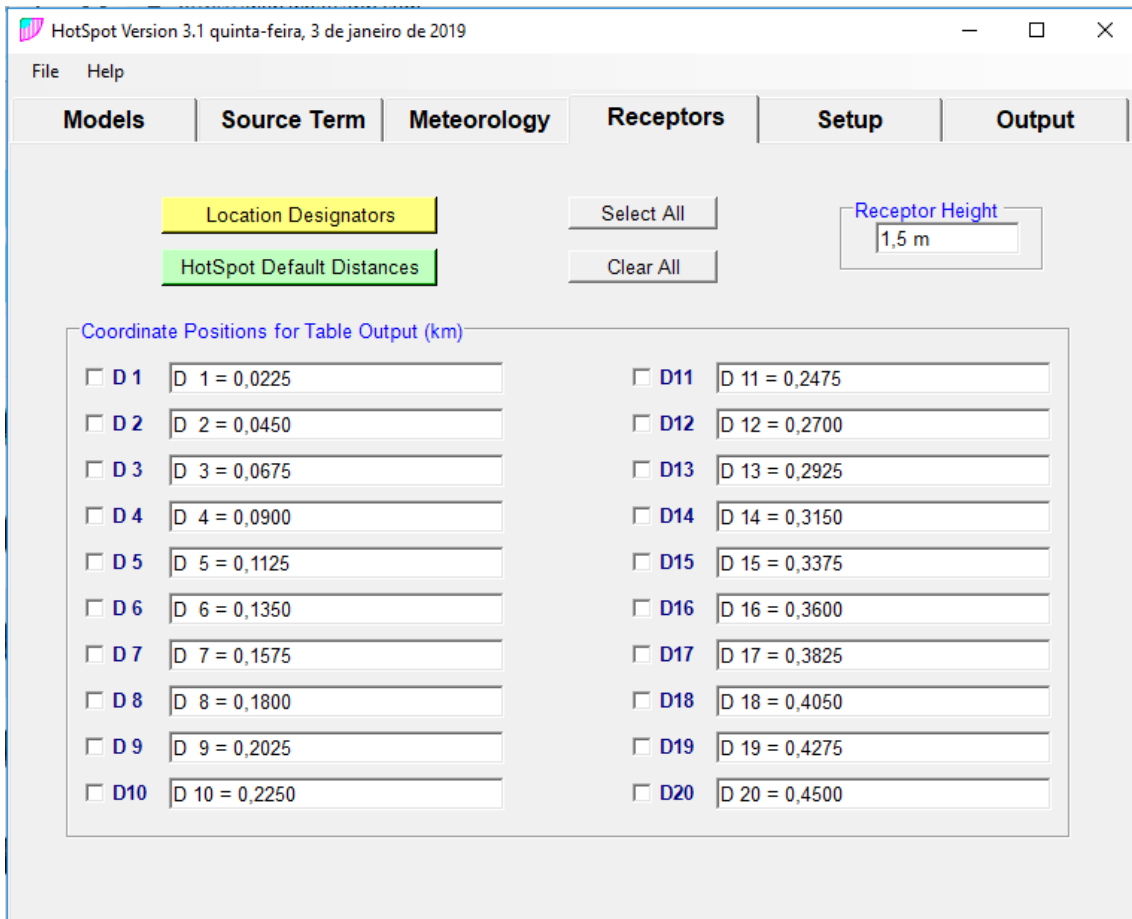


Figura 3.1 – Código HotSpot – Página dos receptores.

Esta etapa tem o objetivo de determinar os valores limites para cada zona desejada na classe A, que são calculados no código HotSpot e informados num arquivo texto (txt), que apresenta todos parâmetros os iniciais do cenário e algumas respostas calculadas pelo HotSpot, como se pode verificar em exemplo na Figura 3.2.

```

HotSpot Table Output - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE
IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 64 m - 82 m (211 ft - 269 ft)
Eardrum ruptures and incapacitation ( 5 psi) : 13 m - 20 m (42 ft - 66 ft)
Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 8,8 m - 13 m (29 ft - 42 ft)
Onset of lethality (25 psi) : 5,7 m - 8,8 m (19 ft - 29 ft)
Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 3,1 m - 5,2 m (10 ft - 17 ft)
Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
corresponds to reflected overpressure generated using
Sandia National Laboratories BLAST model.

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

Maximum Dose Distance : 0,010 km
Maximum TEDE : 10 Sv
Inner Contour Dose : 0,100 Sv
Middle Contour Dose : 0,020 Sv
Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
Exceeds Inner Dose Out To : 0,45 km
Exceeds Middle Dose Out To : 1,0 km
Exceeds Outer Dose Out To : 4,0 km

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

Include Plume Passage Inhalation and Submersion

```

Figura 3.2 – Arquivo texto (.txt) gerado pelo código HotSpot sem receptores.

2. As informações desse arquivo quanto aos limites em cada zona (*Exceeds Inner*, *Middle*, *Outer*, *Dose Out To*), são colocadas na aba correspondente à classe gerada no cenário, nas células de coloração amarela, para determinação dos valores das posições a serem inseridos no código HotSpot, como é apresentado na Figura 3.3.

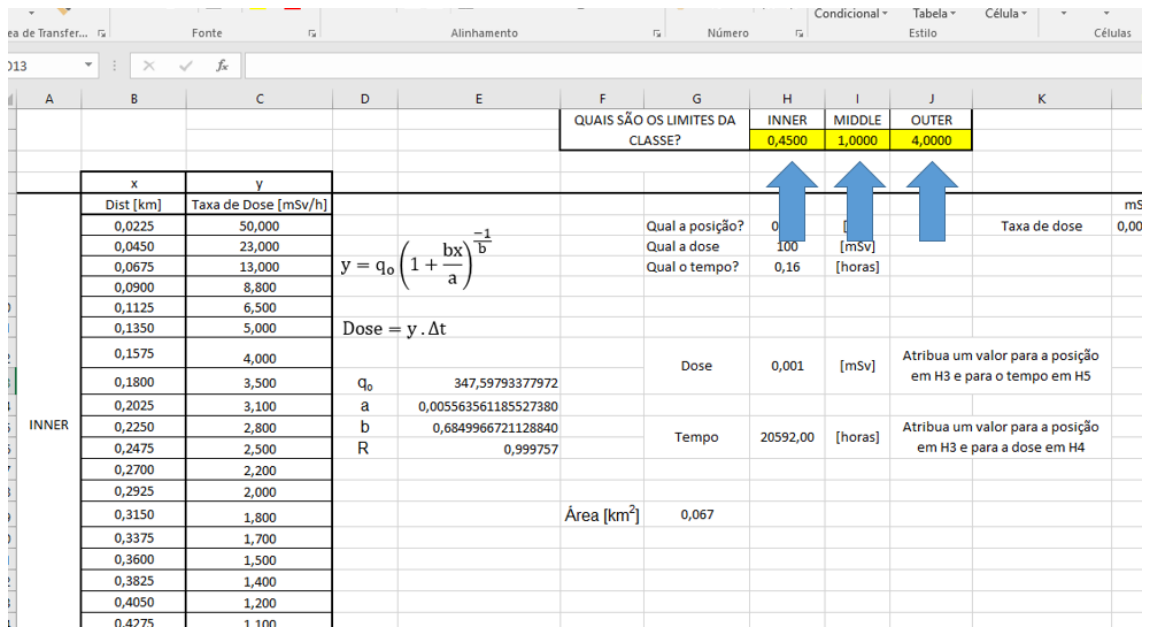


Figura 3.3 – Aba da classe A – Inserção dos limites da classe.

3. Ao se colocarem os valores dos limites nos locais indicados nas setas indicadas na Figura 3.3, a coluna B indicará os valores das posições a serem colocadas nos receptores no código HotSpot para cada zona, *inner*, *middle* e *outer*, na classe estabelecida. Esses valores deverão ser colocados na página de receptores do código HotSpot com suas respectivas quadrículas clicadas, conforme mostra a Figura 3.4. Deve-se então rodar o código três vezes nessa classe, com os valores de posição indicados, onde serão gerados três arquivos textos (ver Figura 3.5), cada um com valores de taxas dose em Sv/h para cada posição assinalada.



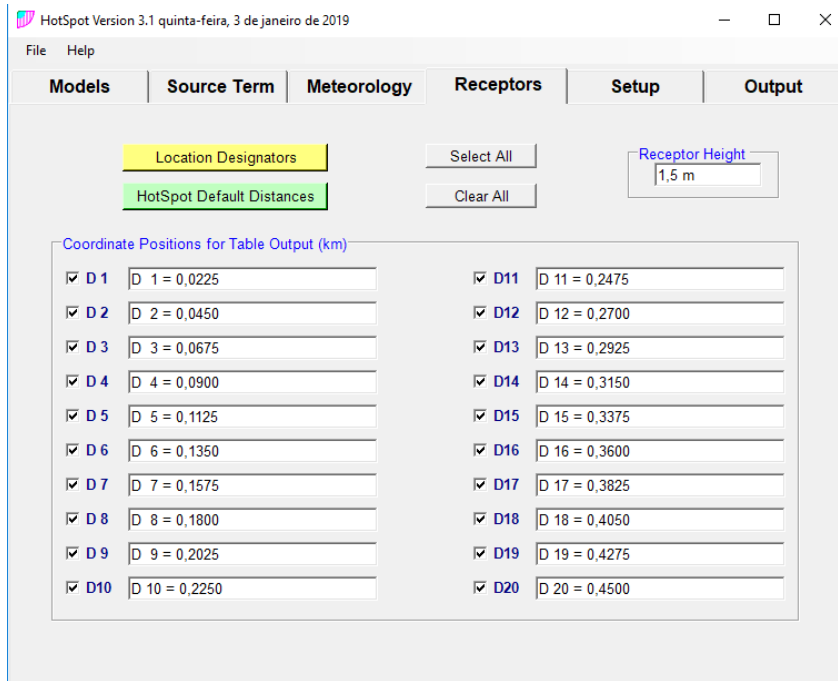


Figura 3.4 – Código HotSpot – Página dos receptores com posições inseridas.

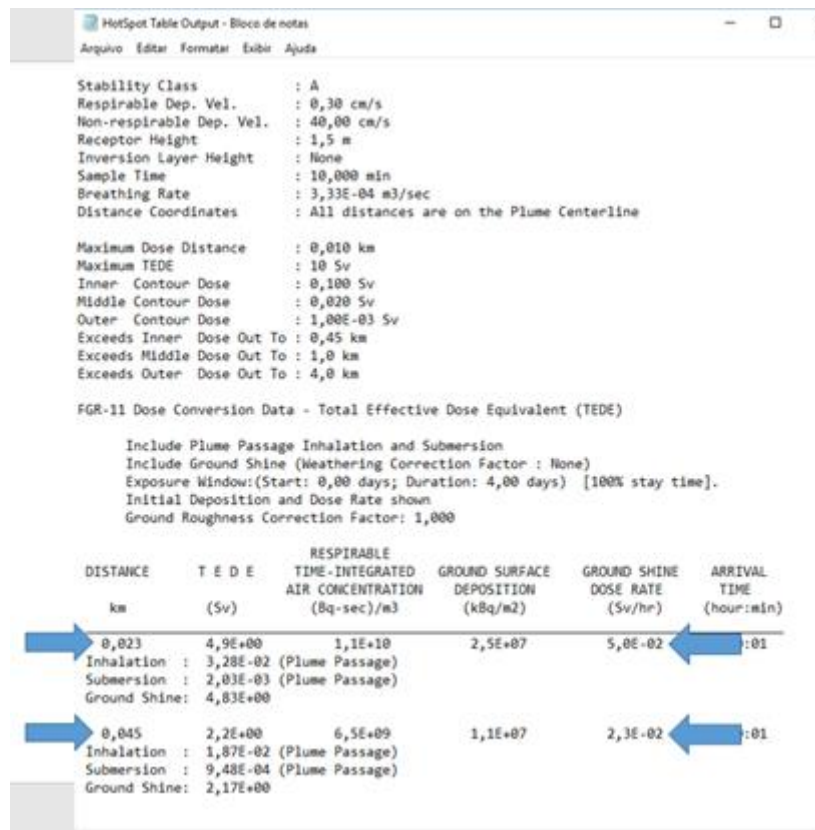


Figura 3.5 – Arquivo texto gerado pelo HotSpot com parâmetros por posição.

4. Com esses valores de posição e taxa de dose, é possível determinar uma função que relacione essas duas grandezas. Para tal, se pode utilizar qualquer software que permita estabelecer essa função, até mesmo o Excel. O software utilizado neste trabalho foi o *CurveExpert Basic 2.1.0*, software gratuito. Introduzem-se os valores nas colunas X e Y e escolhe-se a curva de melhor coeficiente de correlação. A curva escolhida que satisfaz a condição do coeficiente de correlação é a hiperbólica por recorrência nos testes que foram realizados no programa.

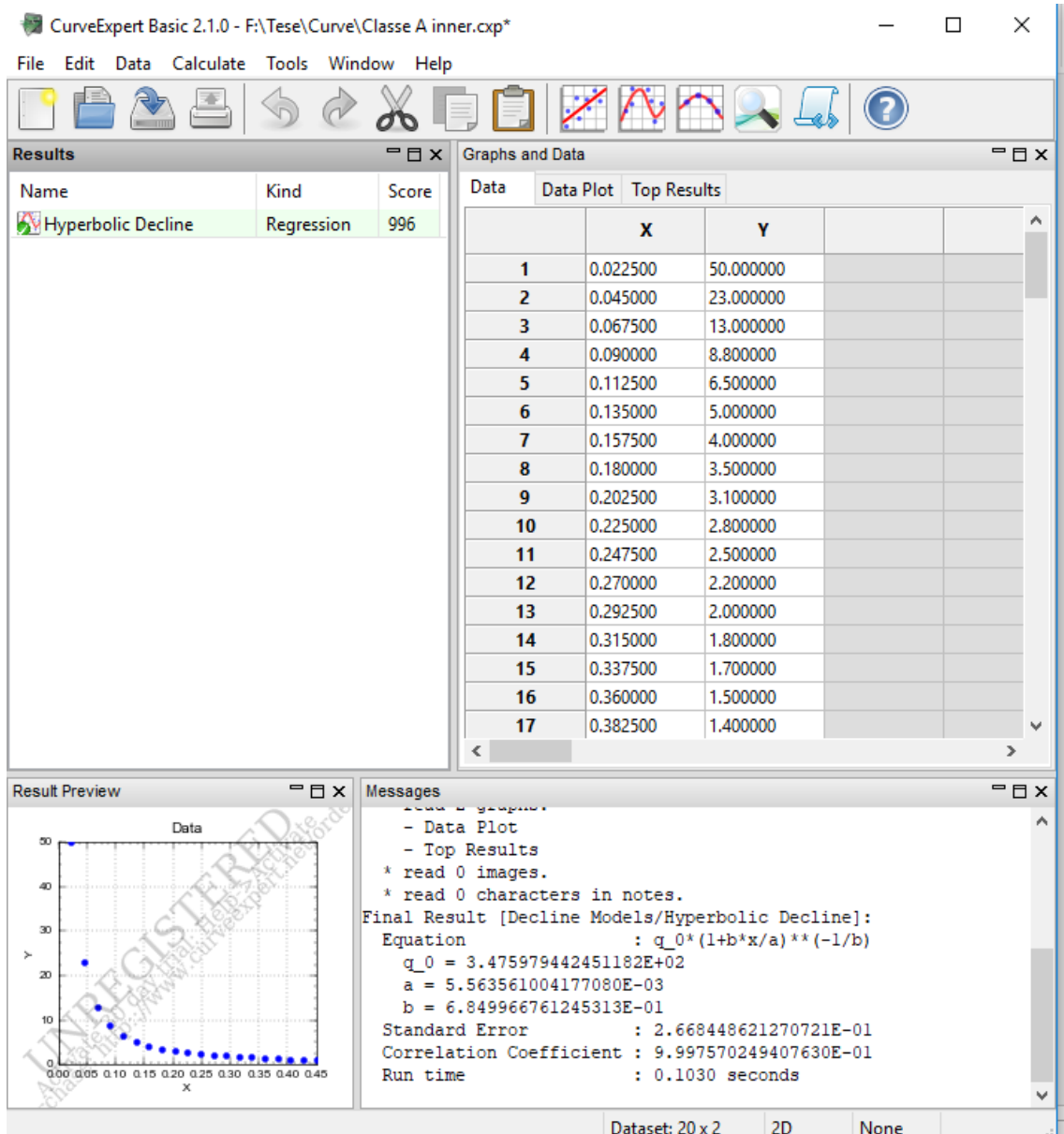


Figura 3.6 – Software CurveExpert – Inserção de valores e definição de função.

Os gráficos mostrados nas Figuras 3.6 e 3.7 apresentam também a função, os coeficientes para a função e o coeficiente de correlação.

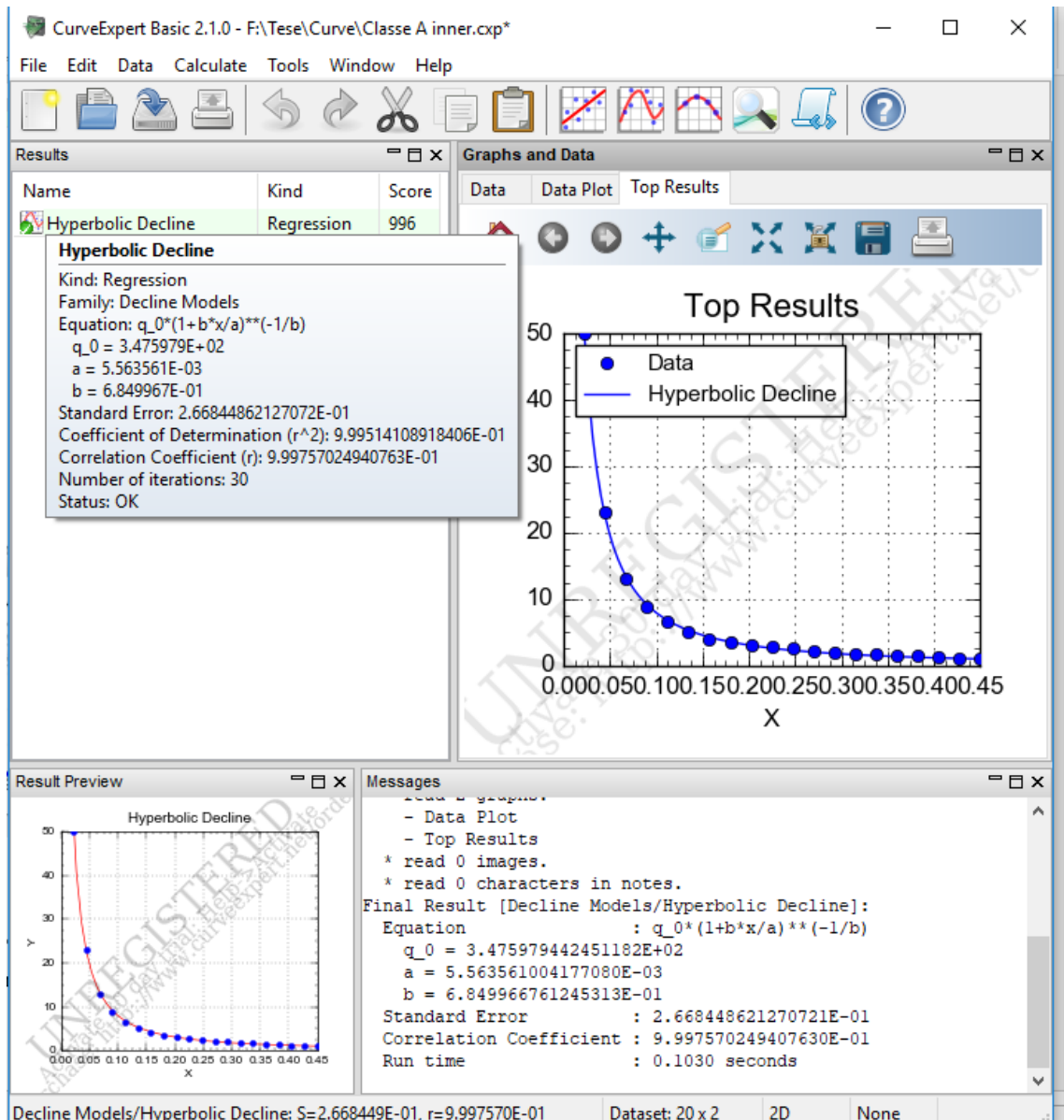


Figura 3.7 – Software CurveExpert – Função definida.

- Com a função e os coeficientes determinados para esta zona nesta classe, a aba da classe correspondente é alimentada com os valores. Tal operação deve ser repetida para cada zona em cada classe de Pasquill-Gifford, como é apresentado na Figura 3.8.

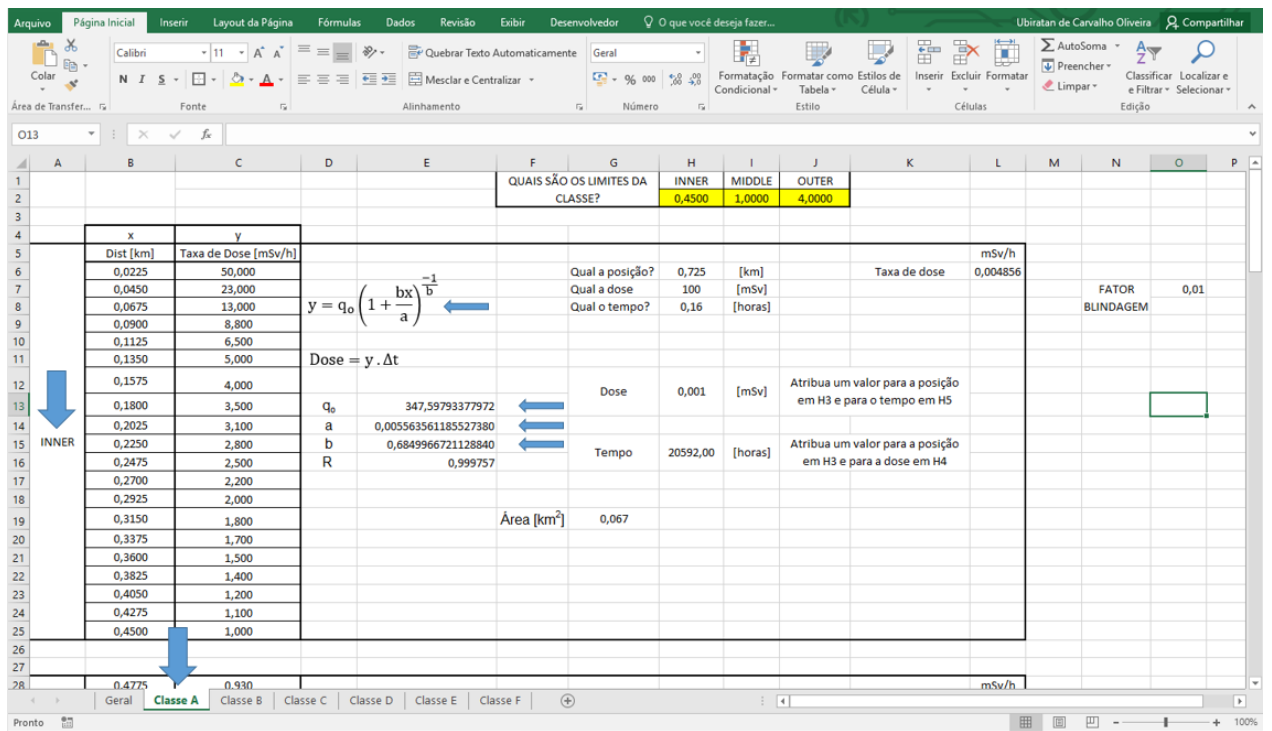


Figura 3.8 – Aba da classe A – Inserção da função e seus coeficientes.

6. Com esses valores introduzidos, a planilha pode ajudar o poder decisório com informações, contidas na aba Geral, sobre diversas evoluções decorrentes do cenário existente. Inicialmente deve-se indicar em que posição, tomando a liberação do RDD como origem, deseja-se obter alguma informação. Ao se escolher a posição a planilha indica que região (zona) em cada classe, a posição escolhida se encontra, colorindo de vermelha a zona quente (*INNER*), como é apresentado na Figura 3.9.

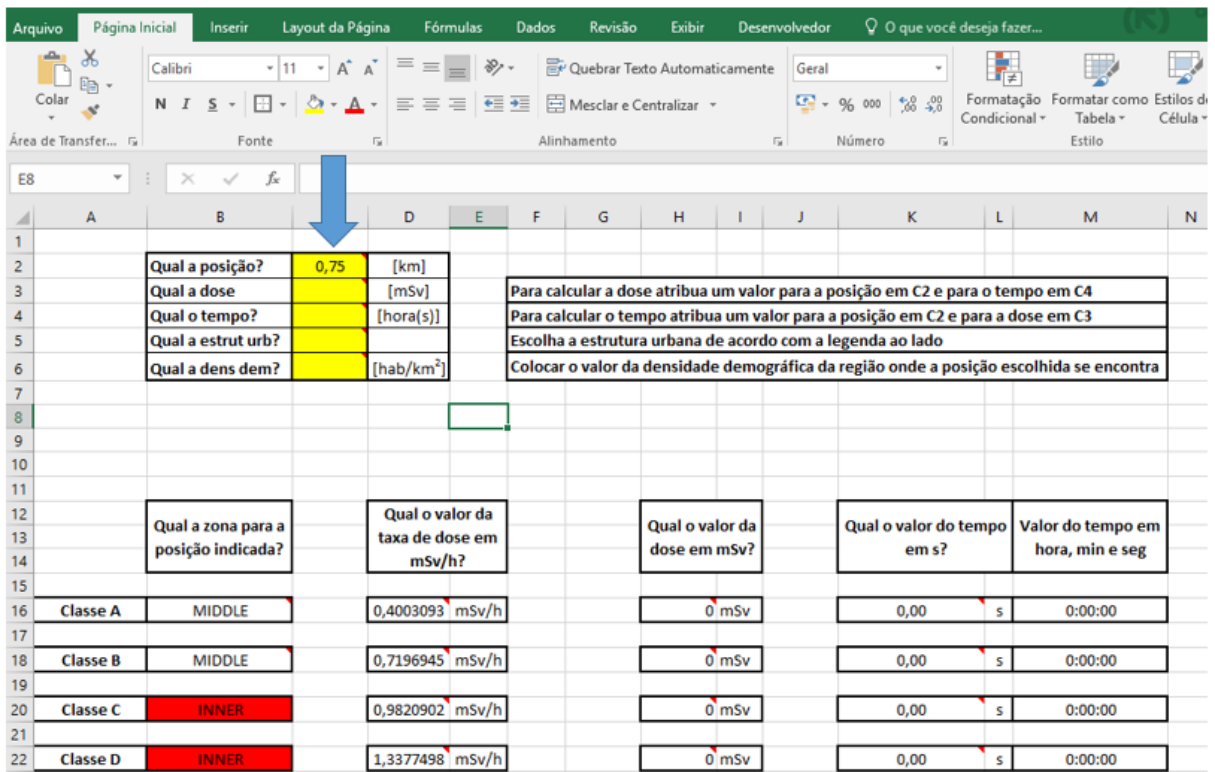


Figura 3.9 – Suplanilha geral – Inserção da posição.

- Neste ponto, duas informações são possíveis de serem obtidas. Uma é a dose que foi absorvida na posição escolhida para um tempo determinado, logo é necessário a escolha do tempo. A segunda é o tempo para atingir uma dose determinada na posição escolhida, logo é necessário estabelecer essa dose. Podem-se estabelecer os dois parâmetros e interpretar o resultado, como é apresentado na Figura 3.10.

Qual a posição?	0,75	[km]
Qual a dose?	100	[mSv]
Qual o tempo?	1	[hora(s)]
Qual a estrut urb?		
Qual a dens dem?		[hab/km <sup>2</sup> ]

Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4  
 Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3  
 Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado  
 Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	Qual o valor do tempo em s?	Valor do tempo em hora, min e seg
Classe A MIDDLE	0,4003093 mSv/h	0,400309 mSv	899.304,71 s	249:48:25
Classe B MIDDLE	0,7196945 mSv/h	0,719694 mSv	500.212,26 s	138:56:52
Classe C INNER	0,9820902 mSv/h	0,98209 mSv	366.565,11 s	101:49:25
Classe D INNER	1,3377498 mSv/h	1,33775 mSv	269.108,63 s	74:45:09
Classe E INNER	1,7957384 mSv/h	1,795738 mSv	200.474,63 s	55:41:15

Figura 3.10 – Aba geral – Inserção da dose e do tempo.

Uma vez que foram escolhidos os dois valores, interpreta-se o valor da dose em mSv atingida naquela posição e tempo escolhidos ou o valor do tempo necessário para atingir a dose estabelecida na posição determinada.

8. É possível também estabelecer um fator de blindagem, definido como estrutura urbana como é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Legenda das estruturas urbanas (blindagem).

0	SEM BLINDAGEM
1	SUBSOLO
2	CASA PRINCIPAL
3	PORÃO
4	2º ANDAR DE LOJA
5	1º ANDAR DE LOJA
6	PAREDE DE CONCRETO DE 9"
7	PAREDE DE CONCRETO DE 12"
8	PAREDE DE CONCRETO DE 24"

A escolha é colocada na célula de estrutura urbana, seguindo a legenda, como é apresentado na Figura 3.11. Todos os valores são imediatamente corrigidos levando-se em consideração o fator estrutura urbana.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a form for inputting data and a table of results. The form is located in the top left, and the table is in the bottom left. The table has 7 columns and 7 rows of data.

	Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	Qual o valor do tempo em s?	Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona	Custo de detrimento para a posição, dens demog e tempo escolhidos [US\$]
16	Classe A MIDDLE	0,040031 mSv/h	0,04003 mSv	8.993.047,09 s	2498:04:07	0 pessoas	US\$ -
17	Classe B MIDDLE	0,071969 mSv/h	0,07197 mSv	5.002.122,57 s	1389:28:43	0 pessoas	US\$ -
18	Classe C INNER	0,098209 mSv/h	0,09821 mSv	3.665.651,12 s	1018:14:11	0 pessoas	US\$ -
19	Classe D INNER	0,133775 mSv/h	0,13377 mSv	2.691.086,27 s	747:31:26	0 pessoas	US\$ -
20	Classe E INNER	0,179574 mSv/h	0,17957 mSv	2.004.746,35 s	556:52:26	0 pessoas	US\$ -
21	Classe F INNER	0,209124 mSv/h	0,20912 mSv	1.721.463,43 s	478:11:03	0 pessoas	US\$ -

Figura 3.11 – Aba geral – Inserção da estrutura urbana.

- Na metodologia é possível também o número aproximado de indivíduos afetados em cada região (zona) de cada classe. Para tal é necessário informar a densidade demográfica em que a posição escolhida se encontra. O número de indivíduos é possível determinar pela área de cada zona, definida pelo código HotSpot. Uma das possibilidades de saída é um gráfico onde mostra a área de cada região (*inner*, *middle* e *outer*) como é apresentado na Figura 3.12.

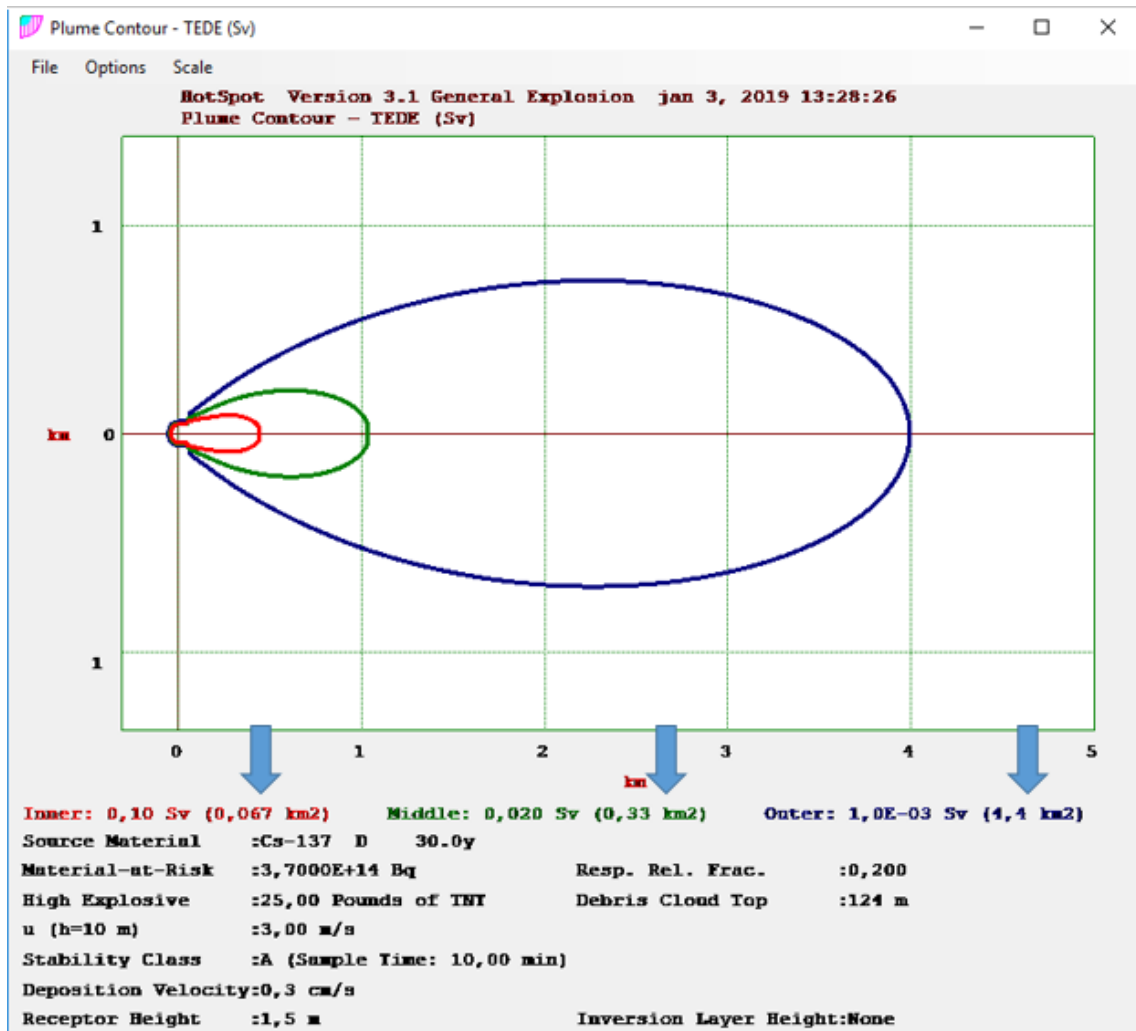


Figura 3.12 – Código HotSpot – Área de cada pluma.

Com essa área e com a densidade demográfica da região da posição escolhida, é possível estimar o número de indivíduos potencialmente afetados numa perspectiva conservativa, superestimando dados reais, como é apresentado na Figura 3.13.



Qual a posição?	0,75	[km]
Qual a dose	100	[mSv]
Qual o tempo?	1	[hora(s)]
Qual a estrut urb?	5	
Qual a dens dem?	6000	[hab/km <sup>2</sup> ]

Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4  
Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3  
Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado  
Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	Qual o valor do tempo em s?	Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona
Classe A MIDDLE	0,040031 mSv/h	0,04003 mSv	8.993.047,09 s	2498:04:07	1.980 pessoas
Classe B MIDDLE	0,071969 mSv/h	0,07197 mSv	5.002.122,57 s	1389:28:43	2.520 pessoas
Classe C INNER	0,098209 mSv/h	0,09821 mSv	3.665.651,12 s	1018:14:11	660 pessoas
Classe D INNER	0,133775 mSv/h	0,13377 mSv	2.691.086,27 s	747:31:26	780 pessoas
Classe E INNER	0,179574 mSv/h	0,17957 mSv	2.004.746,35 s	556:52:26	720 pessoas
Classe F INNER	0,209124 mSv/h	0,20912 mSv	1.721.463,43 s	478:11:03	660 pessoas

Figura 3.13 – Aba geral – Inserção da densidade demográfica na área da posição escolhida.

10. Na metodologia é possível também determinar o custo de detrimento, que é o custo estimado total para recuperação de indivíduos em uma zona afetada, tomando-se por base o valor sugerido pela Agência Internacional de Energia Atômica, adaptado pela CNEN para o cenário brasileiro, que é de US\$10.000/(pessoa . Sv). Como a planilha é capaz de estabelecer o valor da dose absorvida e estimar o número de pessoas afetadas, é possível estabelecer uma estimativa do custo de detrimento, como é apresentado na Figura 3.14.

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	Qual o valor do tempo em s?	Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona	Custo de detrimento para a posição, dens demog e tempo escolhidos [US\$]
Classe A MIDDLE	0,040031 mSv/h	0,04003 mSv	8.993.047,09 s	2498:04:07	1.980 pessoas	US\$ 792,61
Classe B MIDDLE	0,071969 mSv/h	0,07197 mSv	5.002.122,57 s	1389:28:43	2.520 pessoas	US\$ 1.813,63
Classe C INNER	0,098209 mSv/h	0,09821 mSv	3.665.651,12 s	1018:14:11	660 pessoas	US\$ 648,18
Classe D INNER	0,133775 mSv/h	0,13377 mSv	2.691.086,27 s	747:31:26	780 pessoas	US\$ 1.048,44
Classe E INNER	0,179574 mSv/h	0,17957 mSv	2.004.746,35 s	556:52:26	720 pessoas	US\$ 1.292,93
Classe F INNER	0,209124 mSv/h	0,20912 mSv	1.721.463,43 s	478:11:03	660 pessoas	US\$ 1.380,22

Figura 3.14 – Aba geral – Determinação do custo de detrimento.

11. Todo esse conteúdo é feito sem que haja uma variação das condições climáticas, isto é, uma mudança de classes de Pasquill-Gifford. Entretanto, a metodologia prevê uma possível mudança dessas classes. Para tal é necessário informar quanto tempo as condições climáticas permaneceram na classe inicial, qual o tempo de observação deve ser feito na nova classe, qual é a classe inicial e para qual classe está se mudando. Todos esses itens constam também da aba geral, como é apresentado na Figura 3.15.

MUDANÇA DE CLASSE									
→	Mudar classe após quanto tempo?	5	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0					
→	Qual o tempo na nova classe?	1	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0					
→	Qual a classe anterior?	f		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia					
→	Qual a nova classe?	a		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia					
	Qual a zona para a posição indicada na nova classe?		Qual o valor da taxa de dose na nova classe, em mSv/h?	Qual o valor da dose total absorvida nas duas classes, em mSv?		Qual o valor do tempo para atingir a dose estipulada, em s?	Valor do tempo, em hora:min:seg		
	CLASSE A	MIDDLE	0,040031 mSv/h	CLASSE F	0,89787 mSv	21.600,00	s	6:00:00	
				CLASSE A	0,9379 mSv				

← Geral Classe A Classe B Classe C Classe D Classe E Classe F +

Figura 3.15 – Aba geral – Inserção de parâmetros para mudança de classe.

Quando são informados esses valores, todas as classes se apagam ficando somente disponível as informações para a nova classe, informando em que região (zona) a posição indicada se encontra na nova classe.

12. A metodologia permite determinar o valor da dose total absorvida nas duas classes, respeitando o tempo em que se permaneceu na classe anterior e o tempo estipulado para a nova classe. Informa também o valor da dose absorvida somente na classe anterior, como é apresentado na Figura 3.16.

MUDANÇA DE CLASSE									
Mudar classe após quanto tempo?		5	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0					
Qual o tempo na nova classe?		1	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0					
Qual a classe anterior?		f		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia					
Qual a nova classe?		a		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia					
Qual a zona para a posição indicada na nova classe?		Qual o valor da taxa de dose na nova classe, em mSv/h?		Qual o valor da dose total absorvida nas duas classes, em mSv?		Qual o valor do tempo para atingir a dose estipulada, em s?		Valor do tempo, em hora:min:seg	
CLASSE A	MIDDLE	0,040031 mSv/h		CLASSE F 0,89787 mSv		21.600,00 s		6:00:00	
				CLASSE A 0,9379 mSv					

Figura 3.16 – Aba geral – Determinação das doses absorvidas nas classes anterior e atual.

13. A metodologia também permite estabelecer o tempo estimado para atingir a dose absorvida estabelecida no início da simulação, levando-se em consideração a mudança de classe, como é apresentado na Figura 3.17.

MUDANÇA DE CLASSE					
Mudar classe após quanto tempo?	5	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0		
Qual o tempo na nova classe?	1	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0		
Qual a classe anterior?	f		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia		
Qual a nova classe?	a		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia		
Qual a zona para a posição indicada na nova classe?		Qual o valor da taxa de dose na nova classe, em mSv/h?	Qual o valor da dose total absorvida nas duas classes, em mSv?	Qual o valor do tempo para atingir a dose estipulada, em s?	Valor do tempo, em hora:min:seg
CLASSE A	MIDDLE	0,040031 mSv/h	CLASSE F 0,89787 mSv CLASSE A 0,9379 mSv	21.600,00 s	6:00:00
				↑	↑

← → **Geral** Classe A Classe B Classe C Classe D Classe E Classe F + ⋮ ←

Figura 3.17 – Tempo para atingir a dose estipulada.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O cenário criado para aplicação da metodologia é resultado de discussão e, por este motivo, foi considerado como resultado e figura neste capítulo.

### 4.1 informações do cenário RDD

Este estudo apresenta uma metodologia que servirá de ferramenta de apoio ao processo decisório para atenuar todo processo de instabilidade advinda de uma detonação de RDD.

A sensação de perda de controle, visto como um fator de extrema relevância deve ser contida e para tal fazem-se necessárias ações que diminuam essa incerteza.

A metodologia proposta foi desenvolvida nas seguintes etapas:

Geração de um cenário no software HotSpot Health Physics codes, onde serão obtidos, a partir de inserção de parâmetros definidores do cenário, um arquivo TXT com informações e um mapa com as plumas e suas respectivas áreas afetadas;

Criação de funções relacionando a taxa de dose absorvida no *ground shine* com as posições a partir do local de liberação do dispositivo, para cada classe;

Elaboração de uma planilha que permita determinar em qualquer classe e a partir de parâmetros iniciais, entre eles a estrutura urbana desejada:

- c.1. a dose absorvida em uma determinada posição e num tempo informado;
- c.2. o tempo de permanência em uma posição para atingir uma dose informada;
- c.3. definição em que zona se encontra a posição determinada na classe;
- c.4. mudança de classe, em função de mudanças nas condições climáticas;
- c.5. o valor da dose total absorvida nas duas classes, caso haja mudança de classe;
- c.6. o tempo para atingir a dose estipulada inicialmente, caso haja mudança de classe.

Na etapa a geração do cenário no software HotSpot (HOMANN 2013), foram adotados alguns parâmetros para que fossem estimadas doses recebidas devido à exposição de indivíduos bem como a contaminação do ambiente por meio de deposição

no solo. Este software faz a simulação de forma conservativa da dispersão de material radiológico utilizando o modelo gaussiano avaliando a contaminação de uma área e também estima a Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE) que é o modelo completo da combinação das várias formas com que houve a contaminação, seja causada por material externo, caso em que o material radioativo se encontra ao redor do indivíduo, ou causada por material interno, no caso de uma ingestão ou inalação.

Todos os parâmetros sinalizados como entrada no HotSpot são introduzidos pelo usuário visando definir uma melhor caracterização do cenário de exposição. A seguir verificam-se alguns mais importantes com as justificativas de escolhas:

Material: Cs-137

No cenário simulado foi escolhido o Cs-137 devido suas principais características, dentre elas destacam-se a forma em pó e sua solubilidade em água sendo facilmente absorvido pelos fluidos corporais causando um grave problema no metabolismo do corpo (TAKAHASHI 1977). O Cs-137 é um isótopo radiativo que possui meia-vida de 30,17 anos e que no seu processo de decaimento emite partículas beta (PALLER, JANNIK ET AL. 2014)

Atividade: 3,7 E+14 Bq

No cenário simulado foram escolhidas características da fonte de césio levando-se em consideração o documento RS-G-1.9 que versa sobre a categorização das fontes radioativas (IAEA 2005). A atividade escolhida deve-se ao fato de ser a máxima atividade de uma fonte de irradiação de sangue e tecido, cuja classificação é categoria 1.

Velocidade do vento (h = 10 m): 3,0 m/s;

No cenário simulado foi utilizado um valor mais comum observado nesta altura apresentado na região do Rio de Janeiro. A média foi utilizada para ventos brandos visando uma maior dispersão da pluma (OLIVEIRA-JÚNIOR 2017) e haja vista ser um valor real e que para efeito de simulação serve apenas para validar o modelo.

Coordenadas de distância: Todas as distâncias são na linha central da pluma;

Para efeito da construção da planilha, foram consideradas as posições ao longo do eixo maior da elipse correspondente às plumas, que são as linhas que unem todos os pontos que possuem a mesma taxa de dose, ou seja, que estão numa mesma isodose, visando obter resultados mais conservativos., ou seja, que apresentem ou simulem as condições mais severas ou que produzam o pior impacto.

Carga explosiva: 25 libras;

Para efeito da simulação foi utilizado esse valor que equivale a 11,34 kg de TNT, por se tratar de uma pequena quantidade de explosivo e, portanto, de obtenção relativamente fácil;

Classe de estabilidade (terreno padrão): A – F

Para efeito da simulação foram verificadas todas as classes de estabilidade classificadas por Pasquill-Gifford;

Velocidade Deposição respirável: 0,30 cm/s;

Do total do material envolvido na explosão, a fração respirável e que é disponível para a velocidade de dispersão é definido como componente de liberação respirável. Este valor é o valor default para gases não nobres.

Altura do receptor: 1,50 m;

Para efeito da simulação tomou-se este valor pois é a altura do receptor acima do solo e representa o valor médio do receptor na altura das mãos do operador.

Tempo de amostragem: 10 min;

Esse tempo representa o tempo de observação das características da pluma e que geram as equações para o desvio padrão da distribuição da concentração Gaussiana na direção do eixo cruzado. Na direção a favor do vento, essas concentrações são

inversamente proporcionais ao aumento do tempo de amostragem devido ao aumento do meandro da direção do vento, isto é, um fenômeno em que a velocidade do vento varia muito e os contaminantes são dispersos sobre muitos setores angulares.

Taxa de respiração:  $3,33 \text{ E-}04 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Esse é o valor padrão para a taxa de respiração que é assumida para indivíduos expostos dentro da pluma radioativa e que equivale a  $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$  (IAEA 2005).

Contorno da isodose interior: 100 mSv; valor introduzido para a simulação e que corresponde o nível de ação para emergência, segundo o órgão regulatório (CNEN 2011).

Contorno da isodose mediana: 10 mSv, valor introduzido para simulação e que corresponde o nível de ação para abrigagem;

Contorno da isodose exterior: 1 mSv; Valor introduzido para simulação e que corresponde ao limite anual para o público (CNEN 2011).

Biblioteca de fator de Conversão de dose: FGR-11.

Valores constantes na ICRP 30 (*International Commission on Radiological Protection*) que estabelece limites para as ingestões de radionuclídeos por trabalhadores.



Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na simulação do cenário.

PARÂMETRO	VALOR
Material	Cs-137 D 30.0y
Atividade	3,7000E+14 Bq
Fração do material impactado (DR)	1,00
Fração do material liberado para a atmosfera (ARF)	1,000
Fração do material respirável (RF)	0,200
Fator de vazamento (LPF)	1,000
Velocidade do vento	3,0 m/s
Coordenadas de distância	Ao longo da linha central da pluma
Carga explosiva	25 libras
Classe de estabilidade	Classes de Paquill–Gifford de A até F
Velocidade deposição respirável	0,30 cm/s
Altura do receptor	1,50 m
Tempo de amostragem	10 min
Taxa de respiração	$3,33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
Contorno da isodose interior	100 mSv
Contorno da isodose mediana	10 mSv
Contorno da isodose exterior	1 mSv
Biblioteca de fator de conversão de dose	FGR 11

A seguir serão mostrados todos os passos desde o recebimento da missão de apoio à decisão, explicando cada linha de ação adotada, fruto do cenário acima proposto, separados em cada fase de execução, ou seja, HotSpot, CurveExpert e Simulador.

### 1. HotSpot

Conforme já mencionado, foi adotado o modelo de dispersão atmosférica explosão geral (*General Explosion*), por ser uma simulação originada pela explosão de um RDD.

Os programas de propósitos especiais não são preenchidos porque não são objetos do cenário, haja vista que *Nuclear Explosion* serve ao estudo dos efeitos da explosão em uma superfície de uma arma nuclear, *FIDLER Calibration & Lung Screening* é uma ferramenta cuja proposta é a de calibração de instrumentos de pesquisa na área de radiação em investigações que envolvam o solo bem como uma primeira abordagem acerca de risco de pessoal com relação à absorção de plutônio pelo pulmão, *Radionuclides in the Workplace* consiste na verificação dos radionuclídeos potencialmente presentes em um local de atividades laborais com radiações. A Figura 4.1 mostra a tela referente a esta primeira ação.

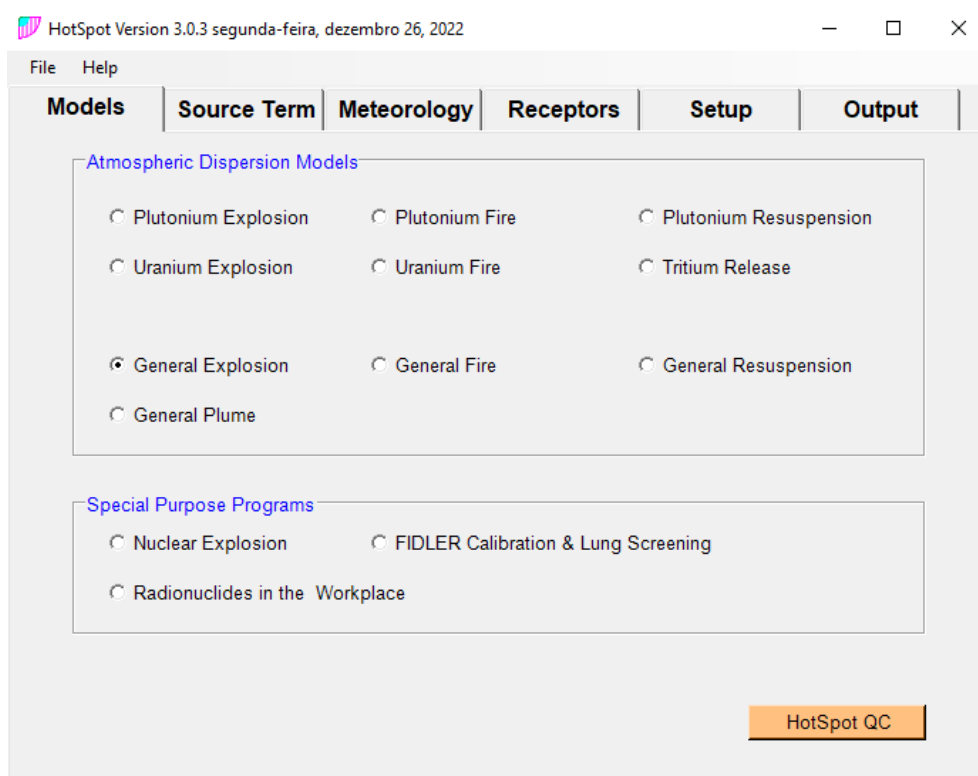


Figura 4.1 – Modelos (*Models*) no HotSpot.

Em seguida, há a identificação da fonte que no cenário simulado o radionuclídeo utilizado foi o Césio-137 com meia-vida considerada de 30,17 anos. A atividade escolhida foi de  $3,7 \times 10^{14}$  Bq por ser a máxima atividade de uma fonte de irradiação de sangue e tecido, sendo categorizada e classificada no documento RS-G-1.9 como categoria 1. A taxa de dano (*Damage Ratio*) que corresponde à fração do material radioativo que realmente impactou o cenário em estudo, para efeitos conservadores, trabalhou-se com a pior hipótese, a fração de 100%. A velocidade de deposição respirável, (*Deposition Velocity*) que é a fração respirável, considera-se o valor *default* para gases não nobres de 0,30 cm/s. O fator de vazamento (*Leakpath Factor*) que é a fração do material radioativo que consegue ultrapassar um confinamento ou algum mecanismo de filtragem, trabalhou-se também com a pior hipótese, a fração de 100%. Quanto ao explosivo, *High Explosive* utilizou-se para efeito de simulação, uma pequena quantidade de explosivo, pouco acima de 11 kg de TNT (trinitrotolueno), que seria de mais fácil obtenção, que no HotSpot é convertido em libras correspondendo a 25 libras. A fração liberada (*Airbone Fraction*) corresponde a fração do material radioativo que é liberada para a atmosfera, de maneira conservadora a fração de 100%. Fração respirável (*Respirable Fraction*) que corresponde

a fração do material radioativo que é respirável, considera-se um valor baixo, cerca de 20% que corresponde a um tamanho de partícula de 0,4  $\mu\text{m}$ . A Figura 4.2 apresenta a entrada de dados correspondente a esta segunda etapa.

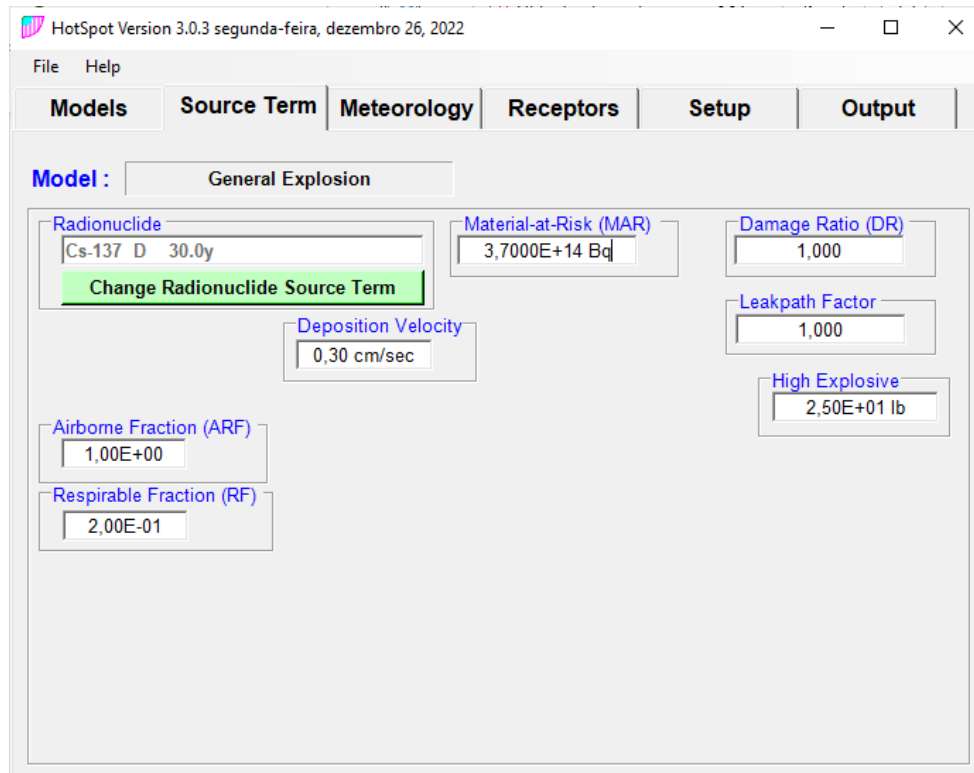


Figura 4.2 – Dados da fonte (*Source Term*) no HotSpot.

Em uma terceira etapa atribuem-se os valores referentes às classes meteorológicas. O primeiro refere-se à velocidade do vento a uma altura de 10 m (*10-meter Wind Speed*), o valor utilizado foi um valor médio comum na cidade do Rio de Janeiro, 3,00 m/s e que corresponde a uma brisa suave. Tal valor é visto quando se aciona as cartas dos ventos, (*Display Wind Chart*). Para a direção do vento (*Wind Direction*) foi utilizada um valor estimado de 0° com a direção norte. Quanto à estabilidade atmosférica (*Atmospheric Stability*) se trabalha com informações solares ou com as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (PG). No caso desta simulação optou-se pelas classes de estabilidade de Pasquill-Gifford local. Para efeitos de cálculos preliminares optou-se pela classe PG A, que representa uma condição climática muito instável. A Figura 4.3 apresenta os dados de entrada nesta fase.

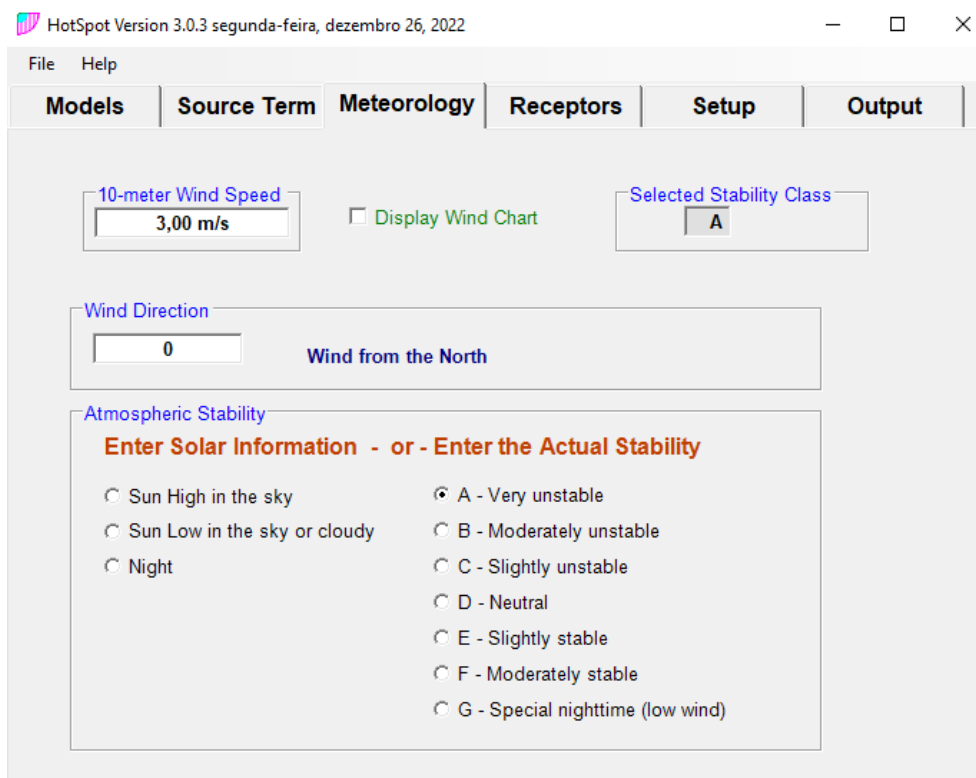


Figura 4.3 – Dados meteorológicos (*Meteorology*) no HotSpot.

Em seguida ocorre a implantação dos dados referentes aos receptores, onde se adotou 1,5 m de altura do receptor (*Receptor Height*) por se tratar de uma altura média do tórax de um operador ou indivíduo do público. Podem ser marcadas até 20 localizações sobre o eixo maior da elipse representativa da pluma de contaminação para a leitura de doses. Após rodar o código, se verifica a extensão linear de cada zona de contaminação, usualmente denominadas quente, morna ou fria, podendo também ser denominadas interna, média ou externa e que no código é representada por *inner*, *middle* e *outer*. Desta forma se podem obter valores de doses em várias posições intermediárias. A Figura 4.4 mostra as condições desta etapa.

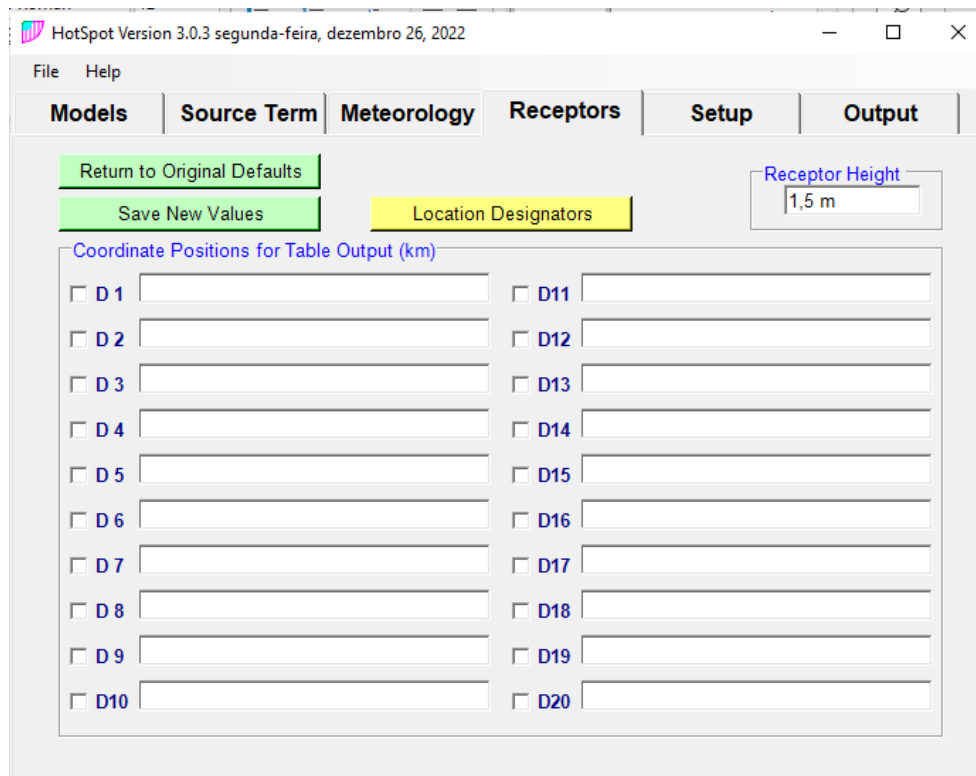


Figura 4.4 – Dados das posições (*Receptors*) no HotSpot.

Agora, a última etapa antes da primeira saída dos dados que é a parte das configurações (*Setup*) e o primeiro valor a ser definido é o terreno (*Terrain*) que para efeito desta simulação foi utilizado o padrão (*Standard*) que corresponde à opção mais conservadora. Em seguida as unidades de medidas radiológicas (*Radiological Units*) se referem ao Sistema Internacional de Unidades (SI), sendo as unidades de distâncias (*Distance Units*) adotadas como métricas (*Metric*), correspondendo ao sistema Americano em vez dos Inglêss. Quanto à altura referência para a tomada da velocidade do vento (*Wind Ref Height*) adotou-se o padrão de 10 m, visto que este é utilizado na maioria dos trabalhos estudados. O tempo para amostragem (*Sample Time*) adotado foi o de 10 minutos que é o tempo padrão adotado pelo código HotSpot para o levantamento em uma amostragem em uma distribuição Gaussiana. A geometria da fonte (*Source Geometry*) adotada foi a simples (*Simple*) que corresponde a geometria padrão em uma liberação de material radioativo no código HotSpot e descarta efeitos de bordas de obstáculos no caminho da pluma de contaminação. A distribuição do modelo de explosão (*Explosion Model Distribution*) foi deixada sem seleção, pois, apenas disponibiliza a visualização dos eixos da elipse que coordena a pluma de contaminação. A camada de mistura (*Mixing*

*Layer*) habilita a quadrícula de inversão (*Enable Inversion*), que corresponde a uma inversão do gradiente de temperatura, uma relação entre a altitude e a temperatura indicando que quanto maior a altitude menor a temperatura. A camada de inversão atua como um teto limitando a mistura da liberação de material radioativo. A região abaixo da camada de inversão é definida como camada de mistura e para efeito desta simulação não estará habilitada. A biblioteca de fator de conversão de doses (*DCF Library*) adotada é o FGR 11 por mostrar os limites da ingestão de radionuclídeos por trabalhadores. A forma de exposição próxima ao solo ou sob efeito de resuspensão (*Ground Shine & Resuspension*) adotada é a próxima ao solo pois serão simulados os efeitos da radiação próximo à superfície (*Include Ground Shine (Weathering Correction Factor: None)*). A taxa de respiração (*Breathing Rate*) adotada é o valor padrão para indivíduos expostos dentro de uma pluma radioativa ( $3,33 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ ). O tempo de espera (*Holdup Time*) adotado é o padrão 0 minutos, que equivale a uma liberação imediata da radiação para a atmosfera. Os valores de contornos das isodoses (*Contour Values*) adotados para as isodoses internas ou interiores, médias ou medianas e externas ou exteriores são 100 mSv, 10 mSv e 1 mSv respectivamente e que correspondem aos valores de ação para emergência (100 mSv), abrigagem (10 mSv) e limite anual para o público em geral (1 mSv). A deposição (*Deposition*) padrão utilizada foi de  $3.700 \text{ kBq}/\text{m}^2$  para a isodose interna e proporcionalmente aos valores de contornos em Sievert (Sv) sendo, 370 para a isodose mediana e 37 para a isodose externa. A velocidade de deposição não respirável (*Non-respirable Deposition Velocity*) que para o modelo de dispersão atmosférica explosão geral o valor é de 40 cm/s. Por fim a deposição úmida (*Wet Deposition*) que consiste em habilitar chuva (*Enable Rainout*) que no caso em estudo não será habilitado. A Figura 4.5 apresenta as escolhas para esta etapa.

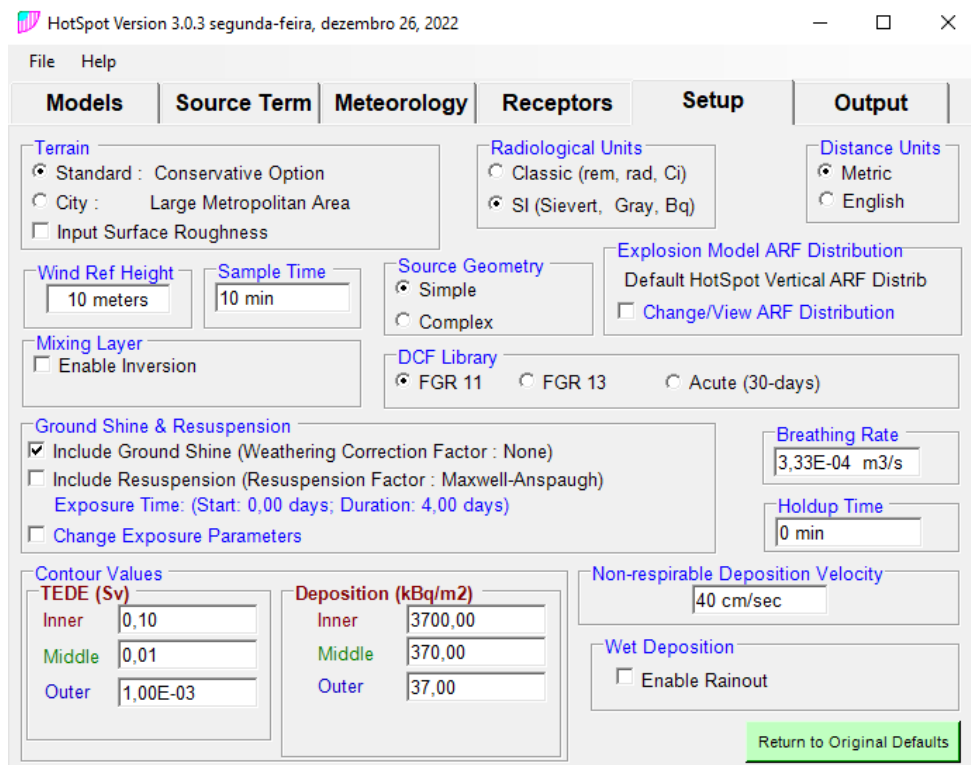


Figura 4.5 – Configurações (*Setup*) no HotSpot.

Os dados de saída são mostrados pelo código em *Output* (Figura 4.6) onde no primeiro item será liberado um arquivo de extensão txt com os valores inseridos e as tomadas de taxas de doses em cada isodose, mostrados na Figura 4.7. Em *TEDE Contour Plot* (Figura 4.8) são mostradas as isodoses com respectivas áreas.

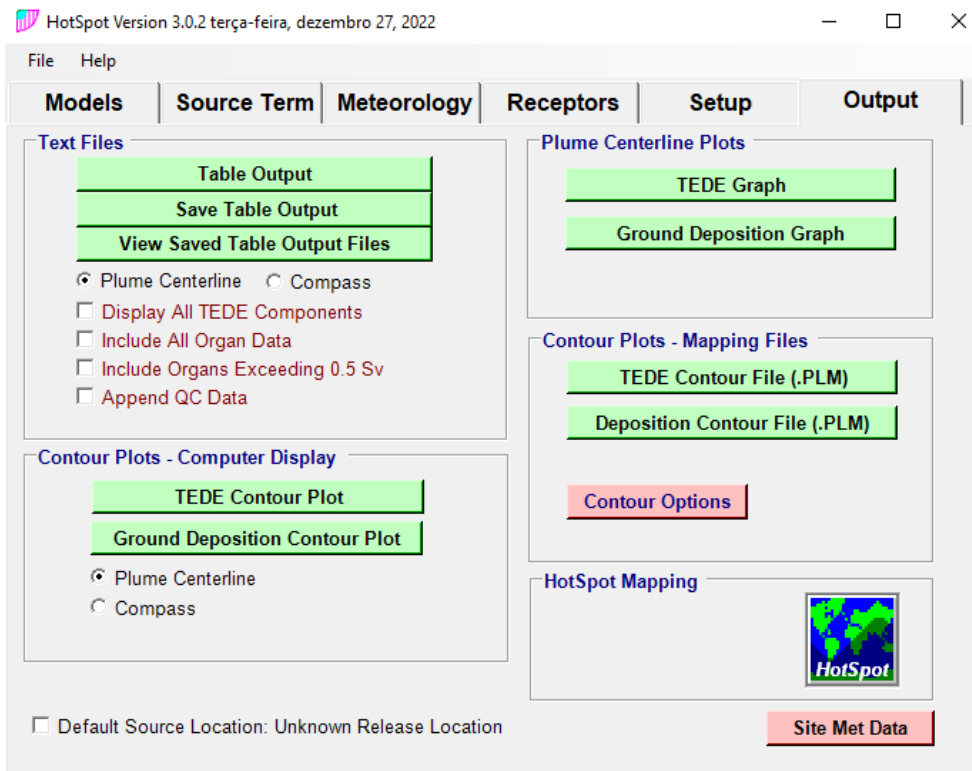


Figura 4.6 – Dados de saída (*Output*) no HotSpot.



HotSpot Version 3.0.3 General Explosion  
dez 26, 2022 06:00

Source Material : Cs-137 D 30.0y  
Material-at-Risk (MAR) : 3,7000E+14 Bq  
Damage Ratio (DR) : 1,00  
Airborne Fraction (ARF) : 1,000  
Respirable Fraction (RF) : 0,200  
Leakpath Factor (LPF) : 1,000  
Respirable Source Term : 7,40E+13 Bq  
Non-respirable Source Term : 2,96E+14 Bq  
Wind Speed (h=10 m) : 3,00 m/s  
Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North  
High Explosive : 25,00 Pounds of TNT  
Debris Cloud Top : 124 m  
Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)  
Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 64 m - 82 m (211 ft - 269 ft)  
Eardrum ruptures and incapacitation ( 5 psi) : 13 m - 20 m (42 ft - 66 ft)  
Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 8,8 m - 13 m (29 ft - 44 ft)  
Onset of lethality (25 psi) : 5,7 m - 8,8 m (19 ft - 29 ft)  
Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 3,1 m - 5,2 m (10 ft - 17 ft)  
Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range  
corresponds to reflected overpressure generated using  
Sandia National Laboratories BLAST model.

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

corresponds to reflected overpressure generated using Sandia National Laboratories BLAST model.

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

Maximum Dose Distance : 0,010 km  
 Maximum TEDE : 10 Sv  
 Inner Contour Dose : 0,100 Sv  
 Middle Contour Dose : 0,010 Sv  
 Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv  
 Exceeds Inner Dose Out To : 0,45 km  
 Exceeds Middle Dose Out To : 1,4 km  
 Exceeds Outer Dose Out To : 4,0 km

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

Include Plume Passage Inhalation and Submersion  
 Include Ground Shine (Weathering Correction Factor : None)  
 Exposure Window:(Start: 0,00 days; Duration: 4,00 days) [100% stay time].  
 Initial Deposition and Dose Rate shown  
 Ground Roughness Correction Factor: 1,000

DISTANCE km	T E D E (Sv)	RESPIRABLE	GROUND SURFACE	GROUND SHINE	ARRIVAL
		TIME-INTEGRATED AIR CONCENTRATION (Bq-sec)/m3	DEPOSITION (kBq/m2)	DOSE RATE (Sv/hr)	TIME (hour:min)

Figura 4.7 – Arquivo de saída, com extensão txt, com os valores inseridos e as tomadas de taxas de doses em cada isodose.

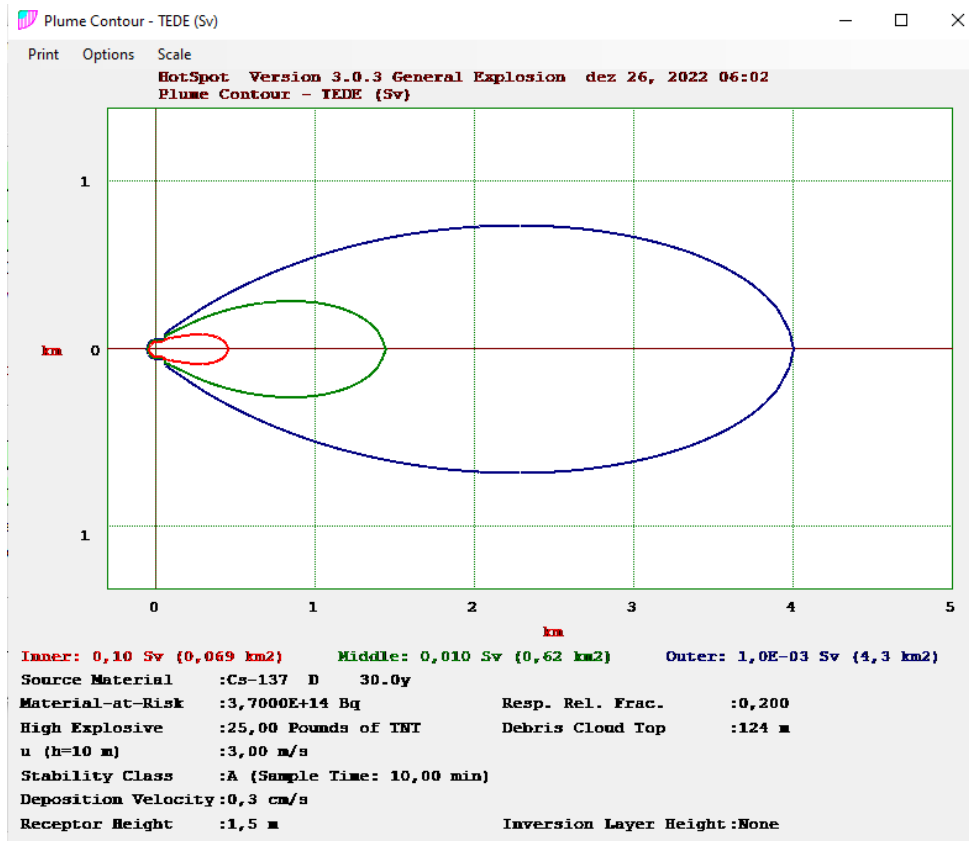


Figura 4.8 – Isodoses com respectivas áreas.

Com esses valores levantados, é possível verificar a extensão linear de cada isodose e com isso criar 1 ou 3 arquivos, em função da precisão que se deseja obter na simulação das taxas de doses em qualquer ponto. Para efeito deste trabalho foram criados 3 arquivos, um para cada zona de contaminação (interna, mediana e externa). Para a zona interna vê-se que a extensão máxima é de 450 m, mostrado na Figura 4.9.

corresponds to reflected overpressure generated using  
Sandia National Laboratories BLAST model.

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

Maximum Dose Distance : 0,010 km  
Maximum TEDE : 10 Sv  
Inner Contour Dose : 0,100 Sv  
Middle Contour Dose : 0,010 Sv  
Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv  
Exceeds Inner Dose Out To : 0,45 km  
Exceeds Middle Dose Out To : 1,4 km  
Exceeds Outer Dose Out To : 4,0 km

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

Include Plume Passage Inhalation and Submersion  
Include Ground Shine (Weathering Correction Factor : None)  
Exposure Window:(Start: 0,00 days; Duration: 4,00 days) [100% stay time].  
Initial Deposition and Dose Rate shown  
Ground Roughness Correction Factor: 1,000

DISTANCE	T E D E	RESPIRABLE	GROUND SURFACE	GROUND SHINE	ARRIVAL
		TIME-INTEGRATED AIR CONCENTRATION (Bq-sec)/m <sup>3</sup>			
km	(Sv)				

<

Figura 4.9 – Extensão linear da zona interna.

Esse valor é útil para se definir os pontos onde se podem obter as doses para essas condições. Retorna-se na parte dos receptores e divide-se esse valor em 20 partes iguais, colocando cada valor nas quadrículas e com isso roda-se o código novamente e obter-se-á o valor das taxas de doses em cada posição determinada.

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion  
dez 27, 2022 07:16

Source Material : Cs-137 D 30.0y  
 Material-at-Risk (MAR) : 3,7000E+14 Bq  
 Damage Ratio (DR) : 1,00  
 Airborne Fraction (ARF) : 1,000  
 Respirable Fraction (RF) : 0,200  
 Leakpath Factor (LPF) : 1,000  
 Respirable Source Term : 7,40E+13 Bq  
 Non-respirable Source Term : 2,96E+14 Bq  
 Wind Speed (h=10 m) : 3,00 m/s  
 Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North  
 High Explosive : 25,00 Pounds of TNT  
 Debris Cloud Top : 124 m  
 Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)  
 Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 64 m - 82 m (211 ft - 269 ft)  
 Eardrum ruptures and incapacitation ( 5 psi) : 13 m - 20 m (42 ft - 66 ft)  
 Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 8,8 m - 13 m (29 ft - 44 ft)  
 Onset of lethality (25 psi) : 5,7 m - 8,8 m (19 ft - 29 ft)  
 Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 3,1 m - 5,2 m (10 ft - 17 ft)  
 Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range  
 corresponds to reflected overpressure generated using  
 Sandia National Laboratories BLAST model.

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

Maximum Dose Distance : 0,010 km  
 Maximum TEDE : 10 Sv  
 Inner Contour Dose : 0,100 Sv  
 Middle Contour Dose : 0,010 Sv  
 Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv  
 Exceeds Inner Dose Out To : 0,45 km  
 Exceeds Middle Dose Out To : 1,4 km  
 Exceeds Outer Dose Out To : 4,0 km

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

Include Plume Passage Inhalation and Submersion  
 Include Ground Shine (Weathering Correction Factor : None)  
 Exposure Window:(Start: 0,00 days; Duration: 4,00 days) [100% stay time].  
 Initial Deposition and Dose Rate shown  
 Ground Roughness Correction Factor: 1,000

DISTANCE	T E D E	RESPIRABLE			
		TIME-INTEGRATED AIR CONCENTRATION	GROUND SURFACE DEPOSITION	GROUND SHINE DOSE RATE	ARRIVAL TIME
km	(Sv)	(Bq-sec)/m3	(kBq/m2)	(Sv/hr)	(hour:min)
0,023	4,9E+00	1,1E+10	2,5E+07	5,0E-02	<00:01

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

Include Plume Passage Inhalation and Submersion  
 Include Ground Shine (Weathering Correction Factor : None)  
 Exposure Window:(Start: 0,00 days; Duration: 4,00 days) [100% stay time].  
 Initial Deposition and Dose Rate shown  
 Ground Roughness Correction Factor: 1,000

DISTANCE km	T E D E (Sv)	RESPIRABLE	GROUND SURFACE	GROUND SHINE	ARRIVAL TIME (hour:min)
		TIME-INTEGRATED AIR CONCENTRATION (Bq-sec)/m <sup>3</sup>	DEPOSITION (kBq/m <sup>2</sup> )	DOSE RATE (Sv/hr)	
0,023	4,9E+00	1,1E+10	2,5E+07	5,0E-02	<00:01
0,045	2,2E+00	6,5E+09	1,1E+07	2,3E-02	<00:01
0,068	1,3E+00	4,3E+09	6,6E+06	1,3E-02	<00:01
0,090	8,6E-01	3,1E+09	4,4E+06	8,8E-03	<00:01
0,112	6,3E-01	2,4E+09	3,2E+06	6,5E-03	<00:01
0,135	4,8E-01	1,9E+09	2,5E+06	5,0E-03	<00:01
0,157	3,9E-01	1,5E+09	2,0E+06	4,0E-03	<00:01
0,180	3,4E-01	1,3E+09	1,7E+06	3,5E-03	<00:01
0,203	3,0E-01	1,2E+09	1,5E+06	3,1E-03	<00:01
0,225	2,7E-01	1,1E+09	1,4E+06	2,8E-03	00:01
0,248	2,4E-01	9,9E+08	1,2E+06	2,5E-03	00:01
0,270	2,2E-01	9,1E+08	1,1E+06	2,2E-03	00:01
0,292	2,0E-01	8,3E+08	1,0E+06	2,0E-03	00:01
0,315	1,8E-01	7,6E+08	9,2E+05	1,8E-03	00:01
0,338	1,6E-01	7,0E+08	8,3E+05	1,7E-03	00:01
0,360	1,5E-01	6,4E+08	7,5E+05	1,5E-03	00:01
0,382	1,3E-01	5,9E+08	6,8E+05	1,4E-03	00:01
0,405	1,2E-01	5,5E+08	6,2E+05	1,2E-03	00:01
0,428	1,1E-01	5,1E+08	5,6E+05	1,1E-03	00:02
0,450	1,0E-01	4,8E+08	5,2E+05	1,0E-03	00:02

Figura 4.10 – Arquivo de saída, com extensão txt, com os valores inseridos nas posições dentro da zona interna.

O gráfico de contorno das isodoses tem a forma como apresentada na Figura 4.11.

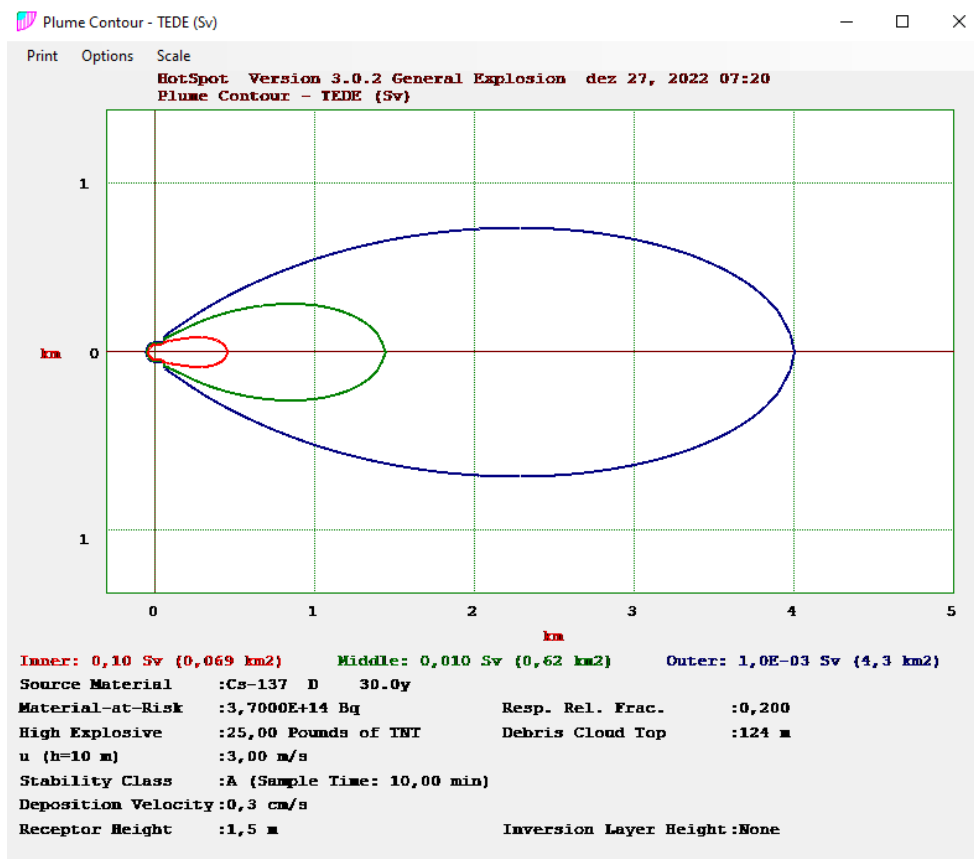


Figura 4.11 – Gráfico das isodoses.

A operação é repetida para as outras curvas de isodoses, levando-se em consideração a extensão de cada pluma. As figuras a seguir mostram os receptores marcados em cada zona.

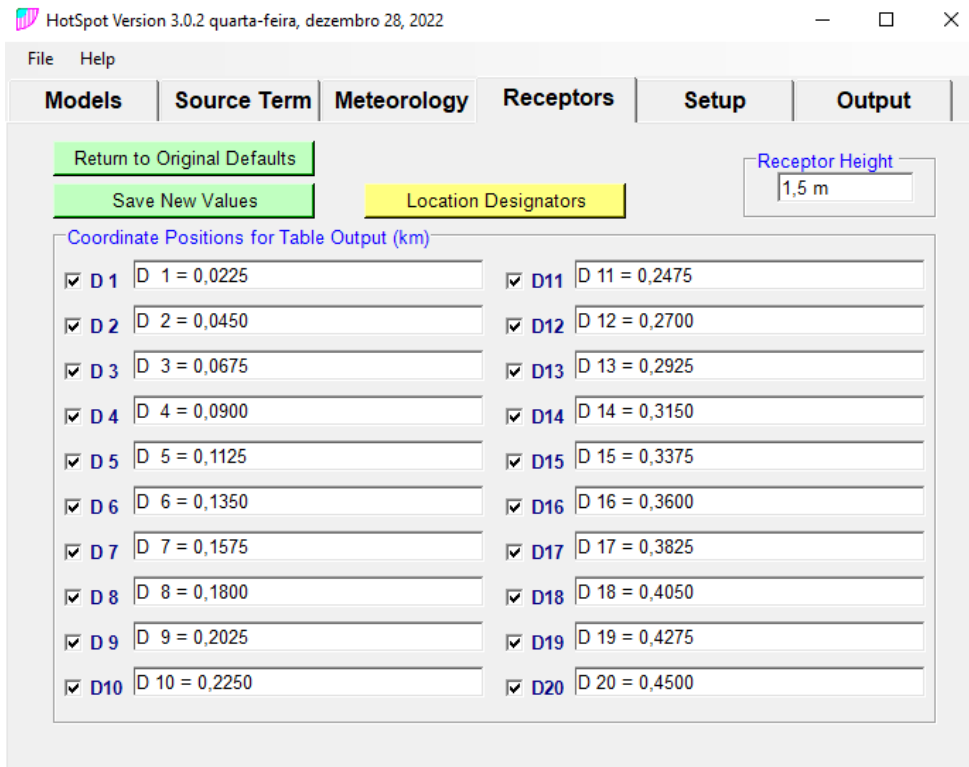


Figura 4.12 – Receptores marcados para a zona interna na Classe A.

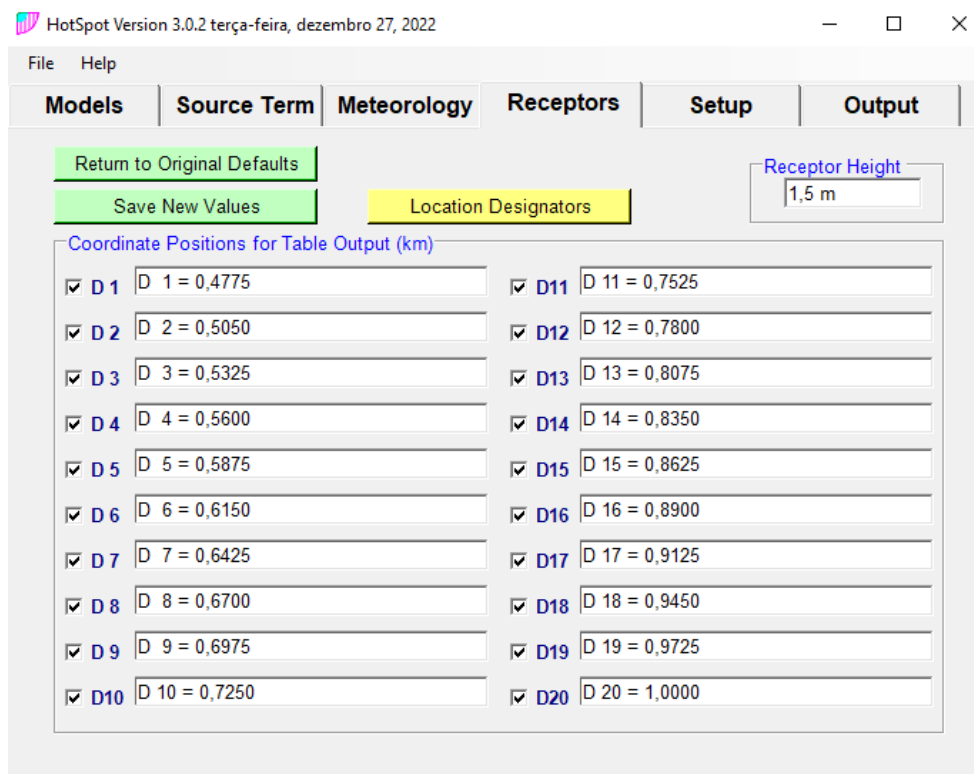


Figura 4.13 – Receptores marcados para a zona mediana na Classe A.



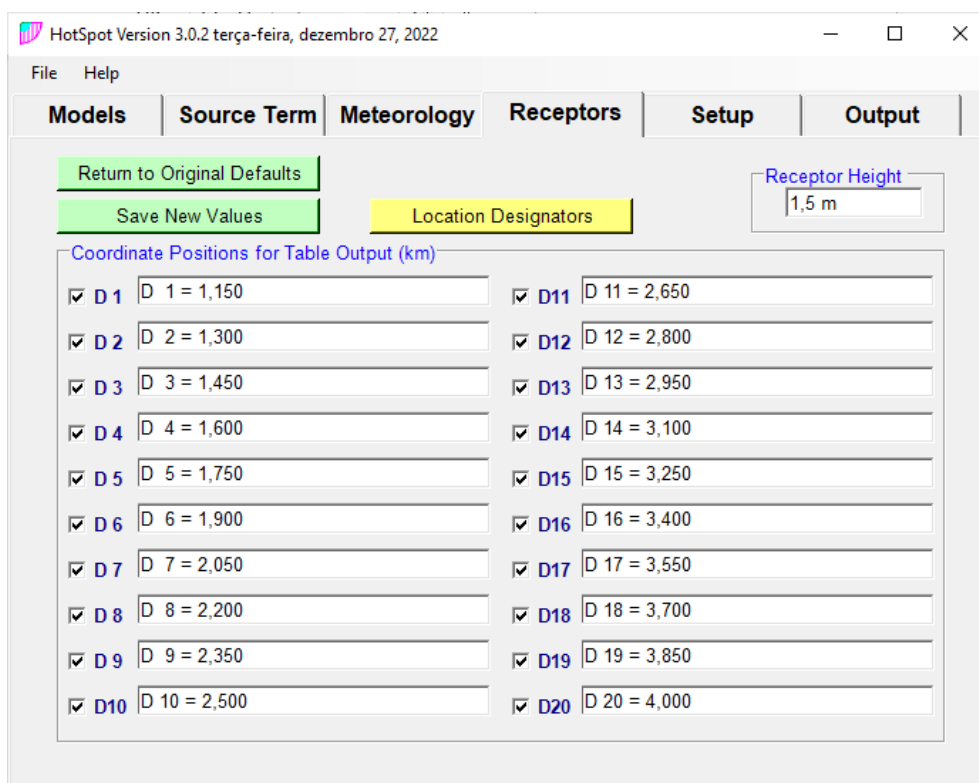


Figura 4.14 – Receptores marcados para a zona externa na Classe A.

Dessa forma, toda classe de estabilidade PG A, está mapeada e pronta para ser estimados valores das taxas de doses em qualquer posição para esta classe. Essa operação deve ser repetida assim que possível para as outras classes de estabilidade visando uma possível mudança de classe de estabilidade futura.

A próxima fase é o levantamento de funções mapeadoras das taxas de doses em qualquer posição. Para esse levantamento foi utilizado o software free CurveExpert.

## 2. CurveExpert

São colocados os valores de posição e correspondentes taxas de doses no software visando determinar a melhor curva, melhor coeficiente de correlação, para possibilitar uma função que permita estimar o valor das taxas de doses em qualquer posição para aquela classe de estabilidade dentro da curva de isodose trabalhada. Assim, colocando no eixo x as posições e no eixo y os valores das taxas de doses correspondentes (Figura 4.15):

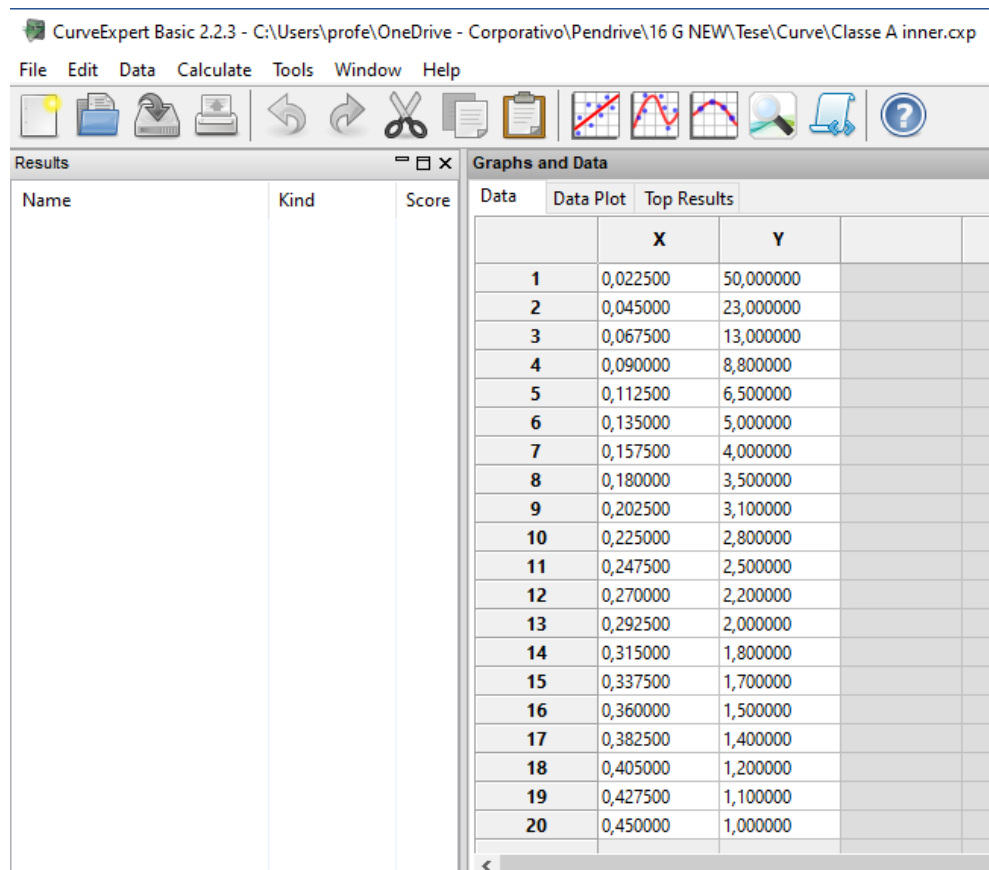


Figura 4.15 – Posições e taxas de doses para Classe A zona interna no CurveExpert.

A curva de declínio hiperbólico foi escolhida (Figura 4.16):

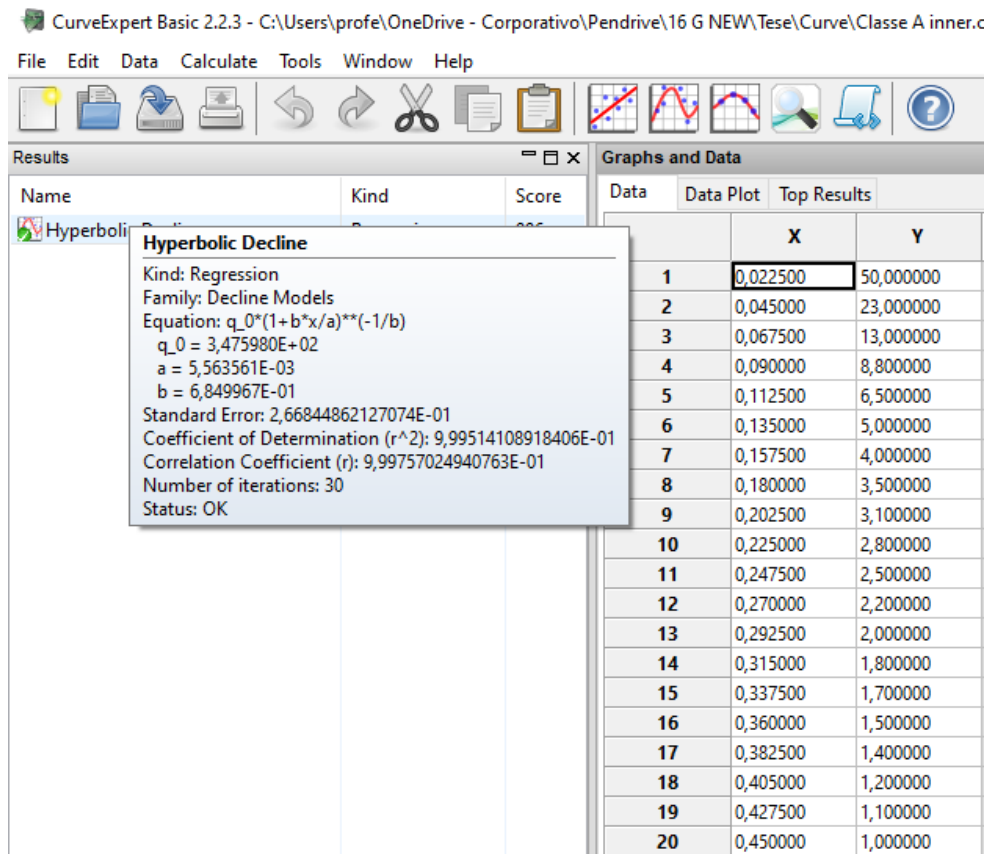


Figura 4.16 – Escolha da função que mapeia a relação posição x taxa de dose.

E seu gráfico apresentado na Figura 4.17:

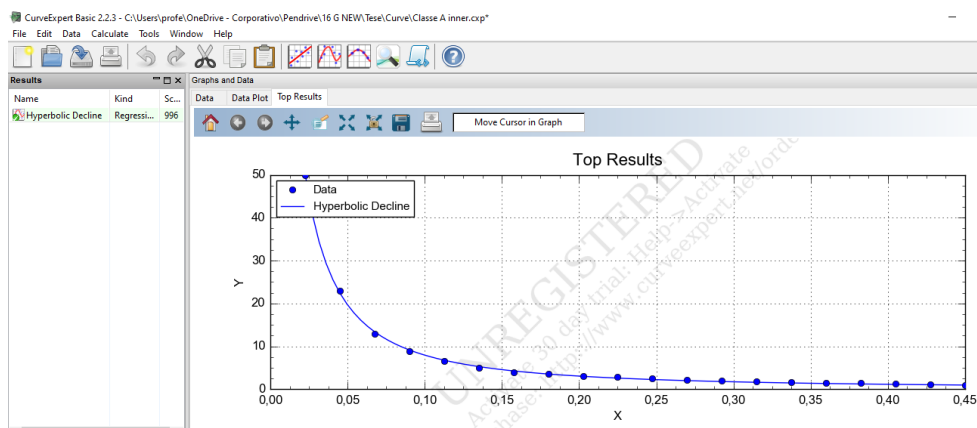


Figura 4.17 – Gráfico da função posição x taxa de dose para a Classe A zona interna.

Essa operação deve ser repetida para cada curva de isodose e em cada classe previamente levantada na etapa anterior.

A próxima e última fase consiste na aplicação do simulador que permitirá o melhor assessoramento ao poder decisor.

### 3. Simulador

Os dados levantados na fase anterior alimentam uma planilha de excel que será a ferramenta responsável pela simulação do cenário. Dessa forma, a curva e seus coeficientes determinados na etapa anterior é lançada e com isso é possível determinar a taxa de dose em uma posição qualquer, para aquela classe de estabilidade inicial (Figura 4.18).

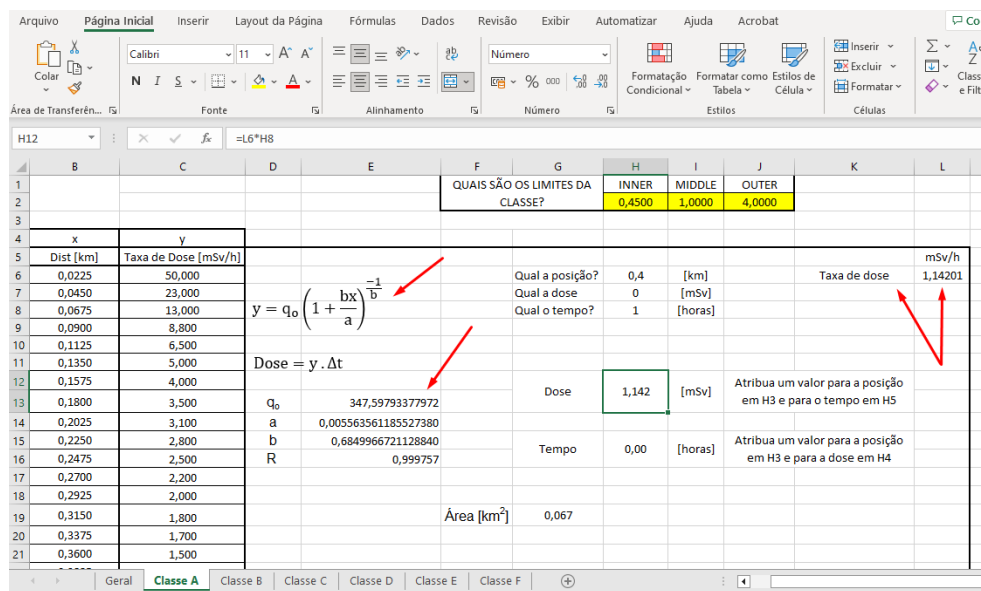


Figura 4.18 – Lançamento da função no simulador.

Uma vez alimentados os valores pertinentes a cada classe, na aba Geral do simulador, é possível fazer algumas estimativas, porém o parâmetro principal é a posição:

1. Escolhida a posição 0,5 m do ponto de lançamento

Imediatamente é mostrado que em que região das curvas de isodose essa posição se encontra, para cada classe de estabilidade, bem como o valor da taxa de dose para aquela posição (Figura 4.19).

Qual a posição?	0,5	[km]	
Qual a dose		[mSv]	Para calcular
Qual o tempo?		[hora(s)]	Para calcular
Qual a estrut urb?			Escolha a estr
Qual a dens dem?		[hab/km <sup>2</sup> ]	Colocar o valc
Qual a zona para a posição indicada?		Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	
Classe A	MIDDLE	0,857904	mSv/h
Classe B	INNER	1,036035	mSv/h
Classe C	INNER	1,602971	mSv/h
Classe D	INNER	2,181645	mSv/h
Classe E	INNER	2,589151	mSv/h

Figura 4.19 – Escolha da posição para estimativa dos dados.

No exemplo simulado, Classe A, verifica-se que a posição se encontra na zona mediana.

## 2. Escolha da dose e tempo

O próximo passo é saber se o que deseja saber é a dose ao fim de um período ou o tempo para atingir determinada dose ou até mesmo as duas coisas.

No exemplo simulado Classe A, deseja-se saber para um tempo de 3h e uma dose de 20 mSv. Desta forma, o simulador estima para cada classe, naquela posição, o valor da dose em mSv e o Tempo Limite de Dose (TLD) (Figura 4.20).

Qual a posição?	0,5	[km]					
Qual a dose	20	[mSv]					
Qual o tempo?	3	[hora(s)]					
Qual a estrut urb?							
Qual a dens dem?		[hab/km <sup>2</sup> ]					

Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4	
Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3	
Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado	
Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra	

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	TLD Qual o valor do tempo em s?	TLD Valor do tempo em hora, min e seg
Classe A MIDDLE	0,857904 mSv/h	2,57371 mSv	83.925,48 s	23:18:45
Classe B INNER	1,036035 mSv/h	3,1081 mSv	69.495,72 s	19:18:16
Classe C INNER	1,602971 mSv/h	4,80891 mSv	44.916,58 s	12:28:37
Classe D INNER	2,181645 mSv/h	6,54493 mSv	33.002,62 s	9:10:03
Classe E INNER	2,589151 mSv/h	7,76745 mSv	27.808,34 s	7:43:28

Figura 4.20 – Escolha da dose e do tempo na posição para estimativa dos dados.

No exemplo, essa posição na Classe A, encontra-se na zona de isodose mediana e em 3h há uma estimativa de se ter alcançado 2,57 mSv sendo 20 mSv alcançado em 23h 18min e 45s.

### 3. Escolha da estrutura urbana e densidade demográfica da região

No exemplo, haverá escolha sobre considerar blindagem ou não e numa região cuja densidade demográfica seja 1.500 hab/km<sup>2</sup>. Dessa forma é possível estimar o número de indivíduos potencialmente afetados numa perspectiva conservativa, superestimando dados reais bem como determinar o custo de detrimento, que é o custo estimado total para recuperação de indivíduos em uma zona afetada, tomando-se por base o valor sugerido pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), adaptado pela CNEN para o cenário brasileiro, que é de US\$10.000 /(pessoa.Sv). Para o exemplo simulado tem-se (Figura 4.21):

Qual a posição?	0,5	[km]					
Qual a dose	20	[mSv]					
Qual o tempo?	3	[hora(s)]					
Qual a estrut urb?	0						
Qual a dens dem?	1500	[hab/km <sup>2</sup> ]					

Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4	
Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3	
Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado	
Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra	

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	TLD Qual o valor do tempo em s?	TLD Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona	Custo de detrimento para a posição, dens demog e tempo escolhidos [US\$]
Classe A MIDDLE	0,857904 mSv/h	2,57371 mSv	83.925,48 s	23:18:45	495 pessoas	US\$ 12.739,87
Classe B INNER	1,036035 mSv/h	3,1081 mSv	69.495,72 s	19:18:16	131 pessoas	US\$ 4.056,08
Classe C INNER	1,602971 mSv/h	4,80891 mSv	44.916,58 s	12:28:37	165 pessoas	US\$ 7.934,71
Classe D INNER	2,181645 mSv/h	6,54493 mSv	33.002,62 s	9:10:03	195 pessoas	US\$ 12.762,62
Classe E INNER	2,589151 mSv/h	7,76745 mSv	27.808,34 s	7:43:28	180 pessoas	US\$ 13.981,42

Figura 4.21 – Lançamento da densidade demográfica da região para estimativa do número de indivíduos potencialmente afetados e custo de detrimento.

Estima-se que 495 indivíduos serão potencialmente afetados e o custo de detrimento é de US\$12.739,87. Cabe ressaltar que o tempo é um fator preponderante no custo de detrimento. Se o tempo de reação for para 10h, o custo passa a ser US\$42.466,25 (Figura 4.22).

Qual a posição?	0,5	[km]	Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4		SEM BLINDAGEM	
Qual a dose?	20	[mSv]	Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3		SUBSOLO	
Qual o tempo?	10	[hora(s)]	Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado		CASA PRINCIPAL	
Qual a estrut urb?	0		Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra		PORÃO	
Qual a dens dem?	1500	[hab/km <sup>2</sup> ]			2º ANDAR DE LOJA	
					1º ANDAR DE LOJA	
					PAREDE DE CONCRETO DE 9"	
					PAREDE DE CONCRETO DE 12"	
					PAREDE DE CONCRETO DE 24"	
					VEÍCULO	

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	TLD Qual o valor do tempo em s?	TLD Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona	Custo de detrimento para a posição, dens demog e tempo escolhidos [US\$]
Classe A MIDDLE	0,857904 mSv/h	8,57904 mSv	83.925,48 s	23:18:45	495 pessoas	US\$ 42.466,25
Classe B INNER	1,036035 mSv/h	10,3603 mSv	69.495,72 s	19:18:16	131 pessoas	US\$ 13.520,36
Classe C INNER	1,602971 mSv/h	16,0297 mSv	44.916,58 s	12:28:37	165 pessoas	US\$ 26.449,03

Figura 4.22 – Aumento do tempo de exposição.

O simulador mostra que uma espera de 4 dias (96h) na tomada de decisão, pode aumentar significativamente todos os valores. A Figura 4.23 mostra um comparativo dos valores de dose e custo de detrimento para 3h e 96h, mantidos os outros valores iguais.

Qual a posição?	0,5	[km]	Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4		SEM BLINDAGEM	
Qual a dose?	20	[mSv]	Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3		SUBSOLO	
Qual o tempo?	3	[hora(s)]	Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado		CASA PRINCIPAL	
Qual a estrut urb?	0		Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra		PORÃO	
Qual a dens dem?	1500	[hab/km <sup>2</sup> ]			2º ANDAR DE LOJA	
					1º ANDAR DE LOJA	
					PAREDE DE CONCRETO DE 9"	
					PAREDE DE CONCRETO DE 12"	
					PAREDE DE CONCRETO DE 24"	
					VEÍCULO	

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	TLD Qual o valor do tempo em s?	TLD Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona	Custo de detrimento para a posição, dens demog e tempo escolhidos [US\$]
Classe A MIDDLE	0,857904 mSv/h	2,57371 mSv	83.925,48 s	23:18:45	495 pessoas	US\$ 12.739,87
Classe B INNER	1,036035 mSv/h	3,1081 mSv	69.495,72 s	19:18:16	131 pessoas	US\$ 4.056,08
Classe C INNER	1,602971 mSv/h	4,80891 mSv	44.916,58 s	12:28:37	165 pessoas	US\$ 7.934,71
Classe D INNER	2,181645 mSv/h	6,54493 mSv	33.002,62 s	9:10:03	195 pessoas	US\$ 12.762,62

Qual a posição?	0,5	[km]	Para calcular a dose atribua um valor para a posição em C2 e para o tempo em C4		SEM BLINDAGEM	
Qual a dose?	20	[mSv]	Para calcular o tempo atribua um valor para a posição em C2 e para a dose em C3		SUBSOLO	
Qual o tempo?	96	[hora(s)]	Escolha a estrutura urbana de acordo com a legenda ao lado		CASA PRINCIPAL	
Qual a estrut urb?	0		Colocar o valor da densidade demográfica da região onde a posição escolhida se encontra		PORÃO	
Qual a dens dem?	1500	[hab/km <sup>2</sup> ]			2º ANDAR DE LOJA	
					1º ANDAR DE LOJA	
					PAREDE DE CONCRETO DE 9"	
					PAREDE DE CONCRETO DE 12"	
					PAREDE DE CONCRETO DE 24"	
					VEÍCULO	

Qual a zona para a posição indicada?	Qual o valor da taxa de dose em mSv/h?	Qual o valor da dose em mSv?	TLD Qual o valor do tempo em s?	TLD Valor do tempo em hora, min e seg	Número aprox de indiv na região da posição escolhida, dentro da zona	Custo de detrimento para a posição, dens demog e tempo escolhidos [US\$]
Classe A MIDDLE	0,857904 mSv/h	82,3588 mSv	83.925,48 s	23:18:45	495 pessoas	US\$ 407.675,96
Classe B INNER	1,036035 mSv/h	99,4594 mSv	69.495,72 s	19:18:16	131 pessoas	US\$ 129.794,46
Classe C INNER	1,602971 mSv/h	153,885 mSv	44.916,58 s	12:28:37	165 pessoas	US\$ 253.910,67
Classe D INNER	2,181645 mSv/h	209,438 mSv	33.002,62 s	9:10:03	195 pessoas	US\$ 408.403,93
Classe E INNER	2,589151 mSv/h	248,559 mSv	27,808,34 s	7:43:28	180 pessoas	US\$ 447.405,38

Figura 4.23 – Comparativo de valores entre 3h e 96h.

O simulador também prevê uma possível mudança de classe de estabilidade após um certo tempo. É possível estimar na nova classe valores de dose alcançada para aquele tempo nas duas classes. No exemplo, as condições climáticas saíram da classe A para a classe B. Dessa forma (Figura 4.24)

Mudar classe após quanto tempo?	3	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0		
Qual o tempo na nova classe?	1	[hora(s)]	Caso não haja mudança de classe, deixar a célula com o número 0		
Qual a classe anterior?	a		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia		
Qual a nova classe?	b		Caso não haja mudança de classe, deixar a célula vazia		
Qual a zona para a posição indicada na nova classe?		Qual o valor da taxa de dose na nova classe, em mSv/h?	Qual o valor da dose total absorvida nas duas classes, em mSv?	Qual o valor do tempo para atingir a dose estipulada, em s?	Valor do tempo, em hora:min:seg
CLASSE B	INNER	1,036035 mSv/h	CLASSE A, 2,57371 mSv CLASSE B, 3,60975 mSv	14.400,00 s	4:00:00

Figura 4.24 – Mudança de Classe.

Dessa forma é possível estimar que após mudar a classe atmosférica, em 1h na nova classe a dose chegou a 3,60975 mSv.

Dessa forma, o simulador consegue fornecer informações estimadas de forma conservadora que possibilitem tomada de decisão frente ao cenário existente que certamente irão mitigar os efeitos de evento dessa natureza. As informações possíveis, para uma determinada posição escolhida, são:

- Em que pluma a posição se encontra em cada Classe de Pasquill-Gifford;
- A taxa de dose nessa posição, em cada Classe de Pasquill-Gifford;
- O valor da dose estimado após um período, na posição indicada, em cada Classe de Pasquill-Gifford;
- O Tempo Limite de Dose para alcançar determinada dose estipulada, na posição indicada, em cada Classe de Pasquill-Gifford;
- A estimativa do número de indivíduos potencialmente afetados, na região, em cada Classe de Pasquill-Gifford;



- f. A estimativa do custo de detrimento para a região indicada, em cada Classe de Pasquill-Gifford;
- g. A estimativa de dose na posição indicada, face a uma mudança de condições climáticas, ou seja, mudança na Classe de Pasquill-Gifford.

Dessa forma, com apoio do simulador desenvolvido e apresentado neste trabalho será possível mitigar os efeitos proporcionados por um cenário de eventos dessa natureza.

## 5. CONCLUSÕES

Este estudo foi dirigido à construção de uma metodologia capaz de dar suporte à tomada de decisão considerando um cenário hipotético extremo (conservador) de acionamento de um dispositivo de dispersão radiológica (RDD). Portanto, o mecanismo RDD é considerado para o objetivo de dano à saúde pública mantendo a integridade física das estruturas da localidade afetada. Seu objetivo principal é então a contaminação de grandes áreas buscando provocar elevado grau de desordem e criar dificuldades de avaliação do cenário pelos tomadores de decisão.

Uma forma de auxiliar a tomada de decisão em uma emergência radioativa desta natureza é disponibilizar estimativas sobre alguns parâmetros do cenário para que se possa, por meio de uma simulação e se possível em tempo real, para estimar potenciais efeitos da dispersão de materiais contaminantes sobre uma sociedade ou zona alvo. Utilizou-se para esse um código computacional de uso corrente (HotSpot). Por meio desta simulação foi possível estimar fatores e modelar consequências decorrentes do acionamento do RDD ao mesmo tempo que se pode fornecer subsídios às agências locais para que possam definir, em tempo hábil, um conjunto de ações que visem a proteção coletiva bem como antecipar potenciais desdobramentos.

Dessa forma, a metodologia proposta neste trabalho pode além de simular um cenário RDD, com auxílio do código HotSpot na determinação de parâmetros iniciais, permitir observação temporal dos efeitos decorrentes, os níveis limitantes para emergência e letalidade em diversas classes de estabilidade climática locais.

Como perspectivas futuras poderá ser considerado o estabelecimento de guias para a otimização de esforços em zonas cuja dose integrada for inferior a 10% da dose inicial de prevista pelo acionamento, previstos em documentos como o EPA-PAG 2017. Ainda, previsão da metodologia para a opção de uma detonação de um IND e um levantamento dos fatores de proteção oferecidos pelas estruturas urbanas que sejam adequadas às edificações tipicamente brasileiras.

Tendo em vista a importância do tema e consequência desse estudo, existe a perspectiva de se criar um Centro de Treinamento em Emergências Radiológicas utilizando inteligência virtual com o objetivo de treinar pessoal para o assessoramento ao poder decisor em eventos dessa natureza.

## 6. REFERÊNCIAS

2007, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". ICRP publication 103. Ann ICRP **37**(2-4): 1-332.

ANDERSON, P. D., BOKOR, G., 2013, "Nuclear and radiological terrorism: continuing education article". J Pharm Pract **26**(3): 171-182.

ANDRADE, E. R., BAUERMAN, L. F., 2010, "Introdução á Radiobiologia – Conexões Bioquímicas e Biomoleculares". Santa Maria, UFSM.

ANDRESZ, S., MORGAN, J., CROUAIL, P., VERMEERSCH, F., 2018, "Conclusions and recommendations from the 17th Workshop of the European ALARA Network 'ALARA in emergency exposure situations'". J Radiol Prot **38**(1): 434-439.

ATTIX, F. H. 1986, *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. New York, Willey.

BARTENFELD, M. T., PEACOCK, G., GRIESE, S. E., 2014, *Public health emergency planning for children in chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) disasters*. Biosecur Bioterror **12**(4): 201-207.

BEERI, E., OWEN, S., BEERI, M., MILLIS, S. R., EISENKRAFT, A., 2018, *A Chemical-Biological-Radio-Nuclear (CBRN) Filter can be Added to the Air-Outflow Port of a Ventilator to Protect a Home Ventilated Patient From Inhalation of Toxic Industrial Compounds*. Disaster Med Public Health Prep: 1-5.

BIANCHI, S., LONGO, A., PLASTINO, W., POVINEC, P. P., 2018, *Evaluation of (7)Be and (133)Xe atmospheric radioactivity time series measured at four CTBTO radionuclide stations*. Appl Radiat Isot **132**: 24-28.

BROGA, D., 2011, *Responding to a Radiological or Nuclear Terrorism Incident: A Guide for Decision Makers*. Med Phys **38**(10): 5831.

BRUM, T. 2017, *Metodologia de Modelagem de Risco Radiológico por Avaliação In Situ utilizando Monitoramento Aéreo com Asa Rotativa*. PhD, Instituto Militar de Engenharia.

CAMERON REED, B. 2011, *Fission fizzles: Estimating the yield of a predetonated nuclear weapon*. American Journal of Physics **79**(7): 769-773.

CASE, C., Jr., COLEMAN, C. N., BADER, J. L., HICK, J., HANFLING, D., 2018, *Guidance, Training and Exercises for Responding to an Improvised Nuclear Device: First Receivers, Public Health*. Health Phys **114**(2): 165-172.

CHILCOTT, R. P., LARNER, J., MATAR, H., 2018, *UK's initial operational response and specialist operational response to CBRN and HazMat incidents: a primer on decontamination protocols for healthcare professionals*. Emerg Med J.  
CNEN (2011). Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Rio de Janeiro.

DORANDEU, F., GILLET, D., 2017, *Editorial for the special issue of the 1st international conference CBRN Research and Innovation Antibes-Juan-les-Pins (France) March 16-19 2015*. Chem Biol Interact 267: 1.

EPA, 2017, *Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents*. Washington, DC U.S. Environmental Protection Agency.

FLORIG, H. K., FISCHHOFF, B., 2007, *Individuals' decisions affecting radiation exposure after a nuclear explosion*. Health Phys 92(5): 475-483.

GALE, R. P. 2017, *Medical and policy considerations for nuclear and radiation accidents, incidents and terrorism*. Curr Opin Hematol 24(6): 496-501.

GIESECKE, J. A., BURNS, W. J., BARRETT, A., BAYRAK, E., ROSE, A., SLOVIC, P., SUHER, M., 2012, *Assessment of the regional economic impacts of catastrophic events: CGE analysis of resource loss and behavioral effects of an RDD attack scenario*. Risk Anal 32(4): 583-600.

GIFFORD, F. A., 1976, "Turbulent diffusion-typing schemes: a review". Nucl. Saf., v17, n° 1, pp 68-86.

GLASER, Z. M. A., 2015, *Nuclear Weapons and Fissile Material Stockpiles and Production*. NPT Review Conference. New York.

HARDING, K. 1991, *ICRP 60 and future legislation*. Nucl Med Commun 12(9): 753-755.

HARPER, F. T., MUSOLINO, S. V., WENTE, W. B., 2007, *Realistic radiological dispersal device hazard boundaries and ramifications for early consequence management decisions*. Health Phys 93(1): 1-16.

HERRMANN, J., 2018, *Fourteenth Annual Warren K. Sinclair Keynote Address: Aren't We Ready Yet? Closing the Planning, Response, and Recovery Gaps for Radiological Terrorism*. Health Phys 114(2): 122-127.

HOFFMAN, I., LEWIS, B., CHAN, P., 2018, *Circulation of cosmogenic (<sup>22</sup>Na) using the global monitoring network of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO)*. J Environ Radioact 187: 8-15.

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

IAEA, 2005, *Categorization of radioactive sources*. Vienna, IAEA.

JEONG, H., PARK, M., JEONG, H., HWANG, W., KIM, E., HAN, M., 2013, *Radiological risk assessment caused by RDD terrorism in an urban area*. Appl Radiat Isot 79: 1-4.

KAKO, M., HAMMAD, K., MITANI, S., ARBON, P., 2018, *Existing Approaches to Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) Education and Training for*

*Health Professionals: Findings from an Integrative Literature Review. Prehosp Disaster Med 33(2): 182-190.*

KIM, C. H., SONG, C. K., LEE, S. H., SONG, S. K., 2008, *Simulating mesoscale transport and diffusion of radioactive noble gases using the Lagrangian particle dispersion model. J Environ Radioact 99(10): 1644-1652.*

KOENIG, K. L., GOANS, R. E., HATCHETT, R. J., METTLER, F. A., SCHUMACHER, T. A., NOJI, E. K., JARRETT, D. G., 2005, *Medical treatment of radiological casualties: current concepts. Ann Emerg Med 45(6): 643-652.*

KUSMIERCZYK-MICHULEC, J., BOURGOUIN, P. 2018, *Influence of mineral dust on changes of (7)Be concentrations in air as measured by CTBTO global monitoring system. J Environ Radioact 192: 454-466.*

LAGZI, I., KARMAN, D., TURANYI, T., TOMLIN, A. S., HASZPRA, L. 2004, *Simulation of the dispersion of nuclear contamination using an adaptive Eulerian grid model. J Environ Radioact 75(1): 59-82.*

LAMARSH, J. R. 1966, *"Introduction to nuclear reactor theory". Addison-Wesley Pub. Co.*

LEROY, C., MARO, D., HEBERT, D., SOLIER, L., ROZET, M., LE CAVELIER, S., CONNAN, O., 2010, *A study of the atmospheric dispersion of a high release of krypton-85 above a complex coastal terrain, comparison with the predictions of Gaussian models (Briggs, Doury, ADMS4). J Environ Radioact 101(11): 937-944.*

MEIT, M., REDLENER, I., BRIGGS, T. W., KWANISAI, M., CULP, D., ABRAMSON, D. M., 2011, *Rural and suburban population surge following detonation of an improvised nuclear device: a new model to estimate impact. Disaster Med Public Health Prep 5 Suppl 1: S143-150.*

METTLER, F. A. 2012, *Medical effects and risks of exposure to ionising radiation. J Radiol Prot 32(1): N9-N13.*

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. T., GOIS, G., 2017, *Estudo da circulação dos ventos na baía de guanabara/rj, entre 2003 e 2013. Revista Brasileira de Climatologia 21: 59-80.*

PALLER, M. H., JANNIK, G. T., BAKER, R. A., 2014, *Effective half-life of caesium-137 in various environmental media at the Savannah river site. J Environ Radioact 131: 81-88.*

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

PORTER, K., LEE, C., 2007, *Radiological terrorism scenarios. Prehosp Disaster Med 22(6): 547.*

POTTER, W., 2010, *"Forecasting Nuclear proliferation in the 21st Century". Stanford University Press.*

- RAKESH, P. T., VENKATESAN, R., HEDDE, T., ROUBIN, P., BASKARAN, R., VENKATRAMAN, B., 2015, *Simulation of radioactive plume gamma dose over a complex terrain using Lagrangian particle dispersion model*. J Environ Radioact 145: 30-39.
- ROTHER, F. C., REBELLO, W. F., HEALY, M. J., SILVA, M. M., CABRAL, P. A., VITAL, H. C., ANDRADE, E. R., 2016, *Radiological Risk Assessment by Convergence Methodology Model in RDD Scenarios*. Risk Anal 36(11): 2039-2046.
- SAINT YVES, T. L. A., CABRAL, P. A. M., BRUM, T., ROTHER, F. C., ALVES, P. F. P. M., LAURIA, D. C., ANDRADE, E. R., 2012, *Terrorist Radiological Dispersive Device (RDD) Scenario and Cancer Risk Assessment*. Human and Ecological Risk Assessment 18(5): 971-983.
- SANTOS, M., 2022, "Após denúncia, cápsula contendo césio-137 é apreendida em Arapiraca". Cada Minuto, 2019. Disponível em: <<https://www.cadaminuto.com.br/noticia/2019/01/22/apos-denuncia-capsula-contendo-cesio-137-e-apreendida-em-arapiraca>>. Acessado em: 20/11/2022.
- SINCLAIR, L. E., FORTIN, R., 2019, *Spatial deconvolution of aerial radiometric survey and its application to the fallout from a radiological dispersal device*. J Environ Radioact 197: 39-47.
- TAKAHASHI, S., 1977, [Publication of ICRP recommendation 26 (author's transl)]. Radioisotopes 26(12): 895-897.
- TAKAHASHI, Y., 2018, *Are We Prepared for Nuclear Terrorism?* N Engl J Med 378(25): 2448-2449.
- TAUHATA, L. S., SALATI, I., PRINZIO, R. D., PRINZIO, A. R. D., 2013, "Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos". Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia Nuclear - Instituto de Radioproteção e Dosimetria.
- THORNTON, R., COURT, B., MEARA, J., MURRAY, V., PALMER, I., SCOTT, R., WALE, M., WRIGHT, D., 2004, *Chemical, biological, radiological and nuclear terrorism: an introduction for occupational physicians*. Occup Med (Lond) 54(2): 101-109.
- TILL, J. E., MEYER, H.R. 1983, *Radiological Assessment: A Textbook on Environmental Dose Analysis*. Washington, D.C.
- URSO, L., KAISER, J. C., WODA, C., HELEBRANT, J., HULKA, J., KUCA, P., PROUZA, Z., 2014, *A fast and simple approach for the estimation of a radiological source from localised measurements after the explosion of a radiological dispersal device*. Radiat Prot Dosimetry 158(4): 453-460.
- VAN MOORE, A., Jr., 2004, "Radiological and nuclear terrorism: are you prepared?" J Am Coll Radiol 1(1): 54-58.

WOLBARST, A. B., WILEY, A. L., NEMHAUSER, J. B., CHRISTENSEN, D .M., HENDEE, W. R., 2010, *Medical Response to a Major Radiologic Emergency: A Primer for Medical and Public Health Practitioners*. Radiology 254(3): 660-677.

YOUNG, C. F., PERSELL, D. J., 2004, "*Biological, chemical, and nuclear terrorism readiness: major concerns and preparedness of future nurses*." Disaster Manag Response 2(4): 109-114.

## A MODELED RADIOLOGICAL DISPERSIVE DEVICE RELEASE AND THE IMPACT TO DECISION-MAKING IN AN URBAN ENVIRONMENT

by

**Paulo U. N. OLIVEIRA<sup>1</sup>, Ubiratan C. OLIVEIRA<sup>2</sup>, Ricardo M. STENDERS<sup>3</sup>,  
Ademir X. SILVA<sup>2</sup>, Helio C. VITAL<sup>1</sup>, Matjaž PRAH<sup>4</sup>, and Edson R. ANDRADE<sup>2,5,6\*</sup>**

<sup>1</sup> Nuclear Engineering Graduate Program, Military Institute of Engineering, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>2</sup> Nuclear Engineering Graduate Program, Federal University of Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ),  
Rio de Janeiro, Brazil

<sup>3</sup> Graduate Program, FAAP, Faculty of Economics, Sao Paulo, Brazil

<sup>4</sup> Department for Nuclear Power Plant in Croatian National Electric Utility – HEP d.d., Zagreb, Croatia

<sup>5</sup> Graduate Program in Development and Environment, Federal University of Paraiba, Joao Pessoa, Brazil

<sup>6</sup> Defense Engineering Graduate Program, Military Institute of Engineering, Rio de Janeiro, Brazil

Technical paper

<https://doi.org/10.2298/NTRP2004316O>

A radiological dispersion device is a weapon that combines radioactive material with conventional explosives for spreading radioactive material across an inhabited area. This study is focused on evaluating key parameters in a radiological dispersion device scenario. The calculations were performed to include two different situations: by using explosives and by simple mechanical release. Simulations were conducted with the use of the HotSpot Health Physics Codes. The results suggest the existence of significant correlations between stability classes in scenarios where they evolve with time, producing alternations between them. As long as the stability class remains constant, this latter finding offers the possibility of creating a suitable response, based on temporal evolutions. Therefore, the purpose of this study is to: estimate the size of the potentially affected population, estimate absorbed doses, and estimate the cost-effectiveness in order to help initial responses by providing time-sensitive information about the event. A methodology capable of providing useful information allows prompt decisions and initial assessments of future risks to be made efficiently. This approach can also provide a training environment for the personnel responsible for the decision-making at an early stage of the response.

*Key words: atmospheric dispersion, contamination, radiation, cost-effectiveness*

### INTRODUCTION

A radiological dispersion device (RDD) is a weapon that combines radioactive material with conventional explosives. This weapon is designed for spreading radioactive material across an inhabited area in a way that considerable resources are needed to mitigate its effects. An RDD can generate damages, and potential threats of social origin to the public [1-3].

This study seeks to assess the impact of key parameters such as dose (total effective dose equivalent - TEDE) and plume area on an RDD scenario. Also, it is intended to investigate the relationship between the radiological release type (explosion or puff), time, cost, local climate features, and consequences in the event of a large-scale radionuclide release from an RDD.

The calculations were performed to assess the effect of two different situations: the use of explosives and the mechanical release of the material. The influence of local climatic conditions on both the radioactive material dispersion and on the collective dose of radiation of a potentially affected population are also addressed. Finally, the possible cost of the corresponding detriment is also evaluated.

Similar studies were recently conducted by two separate groups. Cao *et al.* [4] assessed the TEDE and ground deposition by using the HotSpot health physics computer code with site-specific meteorological conditions. The results indicated that the TEDE and ground deposition decreased with the increase of the downwind distance, nevertheless, remain larger than the regulatory limit for the public. Another group headed by Kim *et al.* [5] focused on the radioactive decontamination waste following the Fukushima nuclear power plant accident in 2011. The study addressed im-

\* Corresponding author; e-mail: fisica.dna@gmail.com



provements in the transportation plans and guidelines for decontamination waste transportation. The group assessed the external dose rates around a transportation vehicle, the collective doses, and the maximally exposed individual doses by computational means.

The release scenario was simulated by using the HotSpot health Physics software [6]. This tool is capable of producing simulations, through Gaussian modeling, that may be of interest for the first responders in the first hours of an RDD event. Even though more complex models with relatively fast responses are also good alternatives [7], some authors have suggested that the Gaussian modeling may be of interest for decisions in the initial phase of the event [1, 8, 9].

An additional contribution may be represented by the ability to use local climatic conditions, represented by the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes [10], to evaluate the evolution of the potential consequences. This evaluation may be of interest if it is associated with the type of release (explosion or non-explosive mechanical release). Decision-makers can rely on the support provided by comparing simulation results, thus enabling a more realistic threat-assessment to be made.

In general, simulation studies via computational platforms suggest improvements in the applied methods, whether from a mathematical or system perspective. In many cases, simulations are applied to a real scenario and assessments can help to clarify problems, improve decision strategies, and even help identify errors that can be avoided in the future. In a slightly more general approach, this work seeks to apply existing methods accepted by the scientific community to general scenarios. The study was conducted in this way so that the focus was always on its creative application. In this way, the HotSpot program was used without the concern with implementing improvements in its programming, although attention was paid to the results aiming to verify any divergences in relation to theoretical predictions about the studied phenomena. The fact that generic scenarios are treated without the intention of comparison, as already mentioned, the input data are not related to a specific location and the results are not compared to other available values in the literature.

## METHODOLOGY

The radiation released to the environment is a key parameter in assessing the radiation dose. This information was considered during the simulation using HotSpot Health Physics software 3.0.3. The program provides a first-order approximation of the radiation effects associated with the atmospheric release of radioactive materials. More accurate predictions are to be expected for short-range simulations (less than 10 km) in the near future (less than a few hours in advance) [6]. Its calculations are based on a Gaussian model, which is

suitable for immediate support to decision-making [6]. Hence, providing accurate results for the period of 48 hours from the incident, as required.

The simulation of the event scenario was performed considering the possibility of triggering the RDD either by a general explosion (GE) or by mechanical release (general – GP). Once the scenarios were simulated two major results were obtained: the area of the contamination plume and its dependence on the Pasquill-Gifford classes as a function of the observation time, and the collective dose of radiation based on the TEDE. The HotSpot output dose values, due to plume passage, have always included the cloud submersion effective dose equivalent with the inhalation committed effective dose equivalent (CEDE). The TEDE is considered as the sum of CEDE (inhalation) and effective dose equivalent (submersion) [6]. The code provides the TEDE, for a whole-body exposure that an individual present in a particular position absorbs after a specified time. Measurements were taken at 18 different points of the plume, six for each dose limit taken along the main axis. This procedure enabled the recording of an average dose value for each dose limit. Subsequently, this average was multiplied by the population size, which was estimated by multiplying plume area and local population density.

Those key parameters are then used, respectively, as input for the calculation of the potentially affected population size and the detriment cost. The input data provided to HotSpot calculations were: source material:  $^{137}\text{Cs}$ ; Material-at-Risk (MAR):  $3.7 \cdot 10^{14}$  Bq; respirable fraction: 0.200; respirable source term:  $7.40 \cdot 10^{13}$  Bq; non-respirable source term:  $2.96 \cdot 10^{14}$  Bq; wind speed ( $h = 10$  m):  $3.00 \text{ ms}^{-1}$ , for it represents the wind speed occurring in all Pasquill-Gifford atmospheric stability classes [10]; High Explosive: 25.00 Pounds of TNT; Stability Class: A to F; Receptor Height: 1.5 m; Distance Coordinates: All distances are measured along the centerline of the plume.

The size of the potentially affected population is estimated by multiplying the area of the contamination plume by the local population density of a large city center, typically considered as 10000 inhabitants per  $\text{km}^2$ . Similarly, the detriment cost, due to the exposure of individuals of the public to environmental radiation, is calculated by multiplying the collective dose by the convenient monetary factor, here considered as the US \$ 10 000 [11]. The collective dose is the sum of the individual doses absorbed during a given period by a specified population. It is calculated by multiplying the mean value of the dose provided by Hotspot for each location inside the plumes. The collective dose is expressed in *person x sievert* (man-Sv). Since the 1980, in quantitative optimization evaluations, experts recommended for the value of the monetary coefficient per unit of collective dose not to be lower than the national currency equivalent to US\$ 10000 per unit of collective dose per individual [12-14].

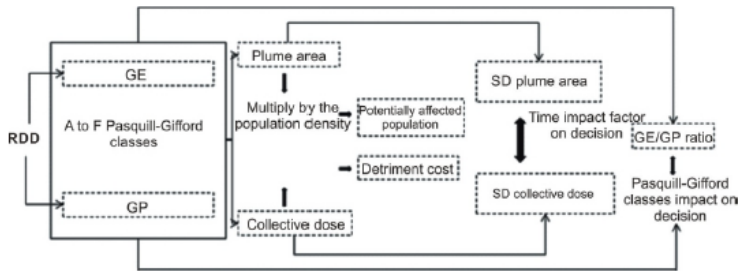


Figure 1. Summary of the methodology used in this work

The concept of detrimental cost, which derives from the collective dose, is defined as the cost of injury obtained per unit dose received by each individual. Or the total health damage experienced by a group exposed to a radiation source. It is a multidimensional concept. The ICRP in its publication No. 22 [9] suggests that it would be useful to express the collective dose assessment in monetary units. Thus, the advantage of reducing the collective dose can be compared directly against the cost to produce such a reduction.

Examples of values suggested by the ICRP: developed world: US\$ 20000, Japan: US\$ 25000, and Brazil: US\$ 10000 [9]. The detriment cost  $Y$  was calculated by the relation  $Y = \alpha S$ , where  $S$  is the collective dose in man-sieverts, and  $\alpha$  is the monetary factor expressed by (US\$/((individual  $\times$  sievert)).

The scenario was simulated considering two possibilities: GE, which considers the use of conventional explosives in the RDD, and GP, where the release is done without the use of explosive means. The simulated data for both GE and GP, organized and shown in figs. 2 and 3, convey both dependences on time and the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes. This led to the idea of choosing key parameters that could be used to quantitatively describe the development of the event scenario as a function of time for each Pasquill-Gifford class. Time (at 1, 6, 12, 24, and 48 hours intervals) and atmospheric stability classes (A to F) were considered as variables.

To study the effects of the release mode (GE or GP) on the development of the scenario, the ratio ( $R = GE/GP$ ) was used for evaluation of plume expansion, potentially affected population, dose, and cost of detriment. All variables are linearly related to each other as they result from the multiplication by a constant.

The release type (either GE or GP) can lead to different demands in terms of the strategic support to the emergency response. The  $R$ -factor can assume the set of values in the ranges:  $R > 1$ ,  $R = 1$ , and  $R < 1$ . The  $R < 1$  range indicates that the GP release (denominator) is more important for the observed atmospheric stability class. Using the same rationale,  $R > 1$  indicates greater influence for GE (numerator). For  $R = 1$ , the release mode is indifferent. Therefore, the  $R$ -factor can drive decision-makers towards a strategic approach.

Time variations within the same atmospheric stability class can be observed regarding the standard deviation (SD), which can be directly used to evaluate the impact of the time on each Pasquill-Gifford class background for a release. However, it is important to note that it is necessary to calculate SD only for the plume area and the collective dose variables. That is due to the significant correlation between them, the potentially affected population, and the cost of detriment. Figure 1 illustrates the methodology used in this work.

## RESULTS

Figure 2 shows the calculated values for simulated GE type of release: (a) area of the contamination plume, (b) potentially affected population, (c) collective dose of radiation, and (d) cost of detriment. All are provided as a function of the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes and time.

Figure 3 shows the calculated values for the simulated GP type of release: (a) plume area, (b) potentially affected population, (c) collective dose of radiation, and (d) cost of a detriment as a function of the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes and time.

Table 1 shows the ratio,  $R$ , between the values for GE and GP ( $GE/GP$ ) for (a) plume area and (b) collective dose.

Figure 4 shows the SD for each Pasquill-Gifford atmospheric stability class as a function of time for the plume area and collective dose.

## DISCUSSION

The effects and possible consequences of the radioactive material released in the environment are functions of time and Pasquill-Gifford atmospheric stability classes. It is important to note that this paper does not consider PG class' variations throughout the event. A more realistic approach might also include this evolution mode for dispersion of the contaminated plume in the environment.

Data for the GE release type, fig. 2, indicate that there is a more pronounced increase in the size of the

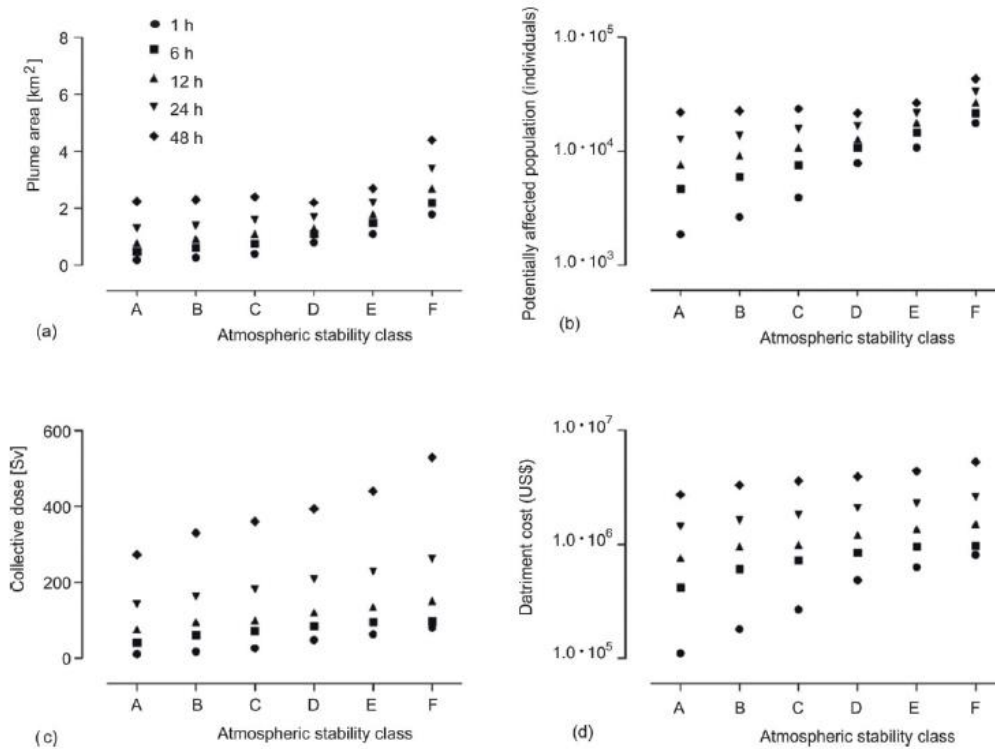


Figure 2. Calculated values for simulated GE type of release as a function of the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes and time: (a) plume area, (b) potentially affected population, (c) collective dose of radiation, and (d) cost of detriment

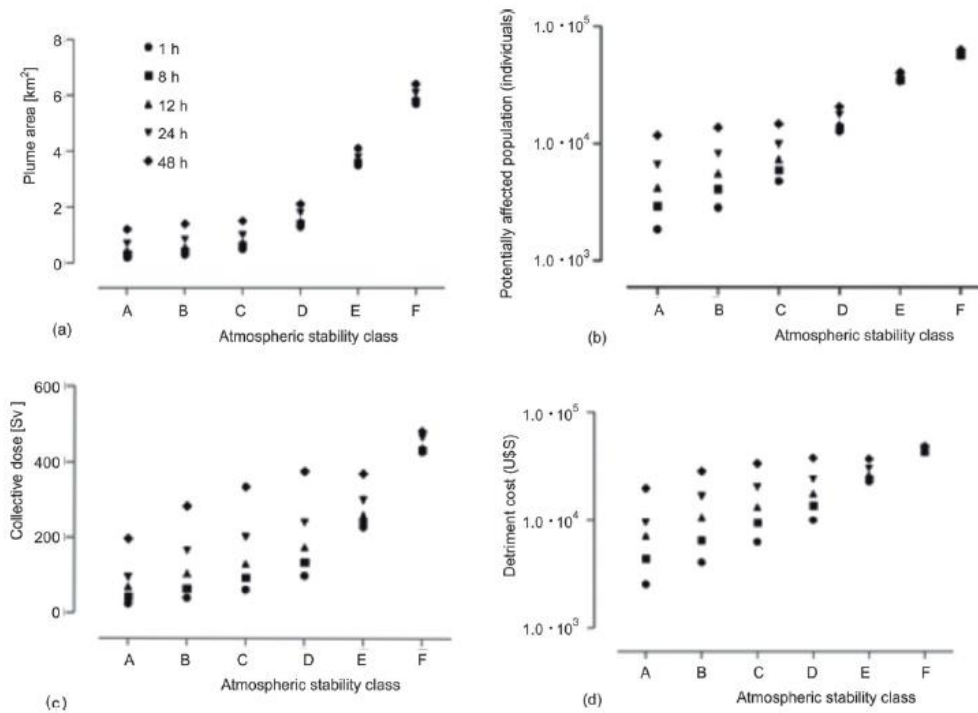


Figure 3. Calculated values for simulated GP type of release as a function of the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes and time, (a) area of the plume, (b) potentially affected population, (c) collective dose of radiation, and (d) cost of detriment

Table 1. Dose ratios,  $R$  for GE and GP (GE/GP)

Atmospheric stability class (Pasquill-Gifford)	Ratio, $R$ – GE/GP		
	Time [h]	Area [km <sup>2</sup> ]	Collective dose [Sv]
A	1	1.000	0.434
	6	1.600	0.952
	12	1.814	1.077
	24	1.912	1.495
	48	1.867	1.385
B	1	0.931	0.445
	6	1.452	0.938
	12	1.632	0.901
	24	1.667	0.982
	48	1.643	1.164
C	1	0.816	0.426
	6	1.262	0.765
	12	1.467	0.754
	24	1.600	0.903
	48	1.600	1.078
D	1	0.615	0.486
	6	0.786	0.624
	12	0.867	0.691
	24	0.944	0.867
	48	1.048	1.046
E	1	0.314	0.275
	6	0.417	0.398
	12	0.500	0.518
	24	0.579	0.764
	48	0.659	1.191
F	1	0.316	0.188
	6	0.379	0.225
	12	0.458	0.344
	24	0.557	0.563
	48	0.688	1.099

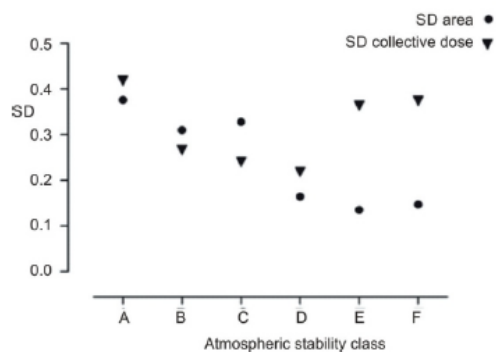


Figure 4. The SD with respect to time for each Pasquill-Gifford atmospheric stability class

contamination plume for atmospheric stability classes E and F, considering the same interval of time elapsed since the explosion. Similar behavior is shown in the simulated results for atmospheric stability classes A, B, and C.

The size of the potentially affected population is a result of the multiplication of the projected transversal area of the radiation plume by the local population density, which is considered constant in this paper. Thus, that parameter depends on the contaminated area, as well as

on the prevailing atmospheric stability classes that could undergo changes as the plume expands. This fact implies the existence of a direct relationship between local atmospheric conditions and the number of people potentially affected by the contamination.

The collective dose parameter shows an increasing trend as the Pasquill-Gifford class ranges from A to F. The finding is relevant for decisions concerning the potentially affected population, such as the need for sheltering and relocation, during the first stages of the response. The present results could help determine which atmospheric stability class has the greatest impact on the collective dose. The cost of detriment is obtained from the collective dose, hence changes in the detriment cost can be correlated to changes in the collective dose. Both as a function of the atmospheric stability classes, but also as a function of time. Taking into consideration the variation within a single atmospheric stability class. This internal stability can be monitored by the SD for each Pasquill-Gifford stability class, and each release mode (GE or GP).

For GP release type, (results shown in fig. 3) there is similar behavior of the calculated values in relation to the atmospheric stability classes. However, there are also significant variations in the spread of the simulated data for each class when examined with reference to time variations. Considering that the plume area and the collective doses are to be used as input data for the calculation of the potentially affected population, and the cost of detriment. Table 1 was prepared for providing an improved evaluation of the phenomenon, including the ratio  $R$  between GE and GP, presented in the methodology.

Thus, an evaluation of the  $R$  values presented in tab. 1 and SD of the values of differences concerning time for plume areas and collective doses presented in fig. 4, suggests that:

- For atmospheric stability class A: the elapsed time of the 1h event presents the only point in which the type of release of radioactive material to the environment is indifferent ( $R = 1$ ). Considering the variable plume area, for all times, except 1 hour,  $R > 1$ , suggests that the GE release type has a preference for damage generation regardless of the Pasquill-Gifford atmospheric stability class. However, for the collective dose variable, the preponderance of the GE release type appears only after 6h of the event. Before that, GP release type is determinant. This finding suggests that the reaction time for response depends on the release type.
- For atmospheric stability classes B and C: the plume area changes significantly in 1 hour, presenting a tendency for damage preference for GP release type ( $R < 1$ ). For the remaining times  $R > 1$ , indicating that GE release type is preferred for damage generation. For the collective dose variable, the preponderance of GP release type is for all times ( $R < 1$ ), this preference being more ac-

- centuated for 1 hour. However, for class C in 48 hours, the GE release type is more important.
- For atmospheric stability class D: for both the plume and the collective dose variable, there is a damage preference for the GP release type ( $R < 1$ ). Except for 48 hours, when both present a GE release type equally preponderant for damage generation. This result suggests that for atmospheric stability classes B and C, decisions involving the parameters: area of the plume and collective dose, have a time limit of 48 hours in cases when the type of release is not known.
  - For atmospheric stability classes E and F and both parameters: plume and collective dose, there is a preference for damage in the GP release type ( $R < 1$ ). Except for the collective dose after 48 hours, when it presents GE release type as preponderant for damage.

Another set of parameters supporting the RDD event scenario evaluation is presented in fig. 4 and refers to the SD of the GE/GP ratio with respect to time for each Pasquill-Gifford class. The quantity SD allows estimating with reasonable accuracy the consistency of data related to the temporal variations within the same class of atmospheric stability.

Considering the expanding area of the contamination plume, as depicted in fig. 4, atmospheric stability classes A, B, and C are associated with faster changes. Atmospheric stability classes D, E, and F are less sensitive to time changes, may offer temporal advantage and flexibility for actions within the same scenario. The change from one PG class to another impacts the number of potentially affected individuals, which changes not only with time but also with the atmospheric stability classes.

Considering how the collective dose is distributed, fig. 4 shows that atmospheric stability classes A, E, and F exhibit greater changes as a function of time. On the other hand, classes B, C, and D are less sensitive. Under the same conditions, class D can be associated with the lowest sensitivity of scenario conditions as a function of time, which facilitates the estimation of the detriment cost. Lower variations within the same atmospheric stability class suggest greater stability of the variable and less temporal bond, usually tending to make decision requirements less stringent.

## CONCLUSION

A simulation of event scenarios and evaluations of the respective results were performed considering two types of radiation release (GE and GP). The results were mostly discussed in terms of two major parameters: contaminated area, and collective dose. They also suggest the possibility of significant correlations between atmospheric stability classes in event scenarios where they evolve over time, producing al-

terations between them. It has been verified that there are non-uniform temporal evolutions within the same atmospheric stability class, for the variables studied. This latter finding offers the possibility of modeling adequate responses based on temporal evolutions, assuming the Pasquill-Gifford atmospheric stability class remains constant. The findings from this study may be an important piece of information for determining an effective response strategy.

## AUTHORS' CONTRIBUTIONS

The simulations of atmospheric dispersion and organization of the results were conducted by P.U.N. Oliveira. The research plan, calculation of the estimated dose, and cost of detriment in the simulated scenario were carried out by E. R. Andrade, P. U. N. Oliveira, U. C. Oliveira, and M. Prah. Theoretical and written revision of the final text was done by A. X. Silva, R. M. Stenders, and H. C. Vital. The writing of the final text and follow-up as a correspondent was the responsibility of E. R. Andrade.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq Grant PQ n° 305463/2020-9).

## REFERENCES

- [1] Harper, F. T., et al., Realistic Radiological Dispersal Device Hazard Boundaries and Ramifications for Early Consequence Management Decisions, *Health Phys.*, 1 (2007), 93, pp. 1-16
- [2] Rother, F. C., et al., Radiological Risk Assessment by Convergence Methodology Model in RDD Scenarios, *Risk Analysis*, 36 (2016), 11, pp. 2039-2046
- [3] Andrade, C. P., et al., Support to Triage and Public Risk Perception Considering Long-Term Response to a Cs-137 Radiological Dispersive Device Scenario, *Toxicology and industrial Health*, 34 (2019), 6, pp. 433-438
- [4] Cao, B., et al., Radiological Consequences Assessment of a Hypothetical Accident, During Transportation of Spent Nuclear Fuel, *Nucl Technol Radiat*, 34 (2019), 1, pp. 94-101
- [5] Kim, M. J., et al., Radiological Safety Assessment for incident-Free Transportation of Radioactive Decontamination Waste After the Fukushima Nuclear Power Plant Accident, *Nucl Technol Radiat*, 34 (2019), 2, pp. 201-208
- [6] Homann, S. G., HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. CA, USA.: Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, UK, 2013
- [7] Claudio Gariazzo, B. L., et al., Cost Action Es1006. Evaluation, Improvement and Guidance of Local-Scale Emergency Prediction and Response Tools for Airborne Hazards in Built Environments: Ongoing Activities, Experiments and Recent Results, *Chemical Engineering Transactions*, 36 (2014), Mar., pp. 529-534

- [8] Conklin, C., Edwards, J., Selection of Protective Action Guides for Nuclear Incidents, EPA, *Journal of Hazardous Materials*, 75 (2000), 2-3, pp. 131-144
- [9] Mettler, FA., Jr. Medical Resources and Requirements for Responding to Radiological Terrorism, *Health Physics*, 89 (2005), 5, pp. 488-493
- [10] Pasquill, F., The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, *Meteorological Magazine*, 90 (1961), pp. 433-491
- [11] \*\*\*, ICRP, Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable, Oxford, 1977
- [12] \*\*\*, ICRP, Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection, Ann ICRP – International Commission on Radiological Protection, 10 (1983), 2-3, pp. 1-75
- [13] Weatherburn, H. A., Realistic Approach to Cost-Benefit Analysis in Radiation Protection, *British Journal of Radiology*, 57 (1984), 682, pp. 847-848
- [14] Thomson, W. H., Roberts, P. J., Cost-Benefit Analysis in Radiation Protection, *Nuclear Medicine Communications*, 7 (1986), 12, pp. 855-856

Received on November 6, 2019  
Accepted on December 21, 2020