

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

JULIANA DE SÁ SANCHEZ

**POTENCIAL INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES NA ESTABILIDADE
ATMOSFÉRICA E DA SUPERFÍCIE DO SOLO SOBRE O RISCO
RADIOLÓGICO AMBIENTAL**

Rio de Janeiro

2019

**POTENCIAL INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES NA ESTABILIDADE
ATMOSFÉRICA E NA SUPERFÍCIE DO SOLO SOBRE O RISCO
RADIOLÓGICO AMBIENTAL**

JULIANA DE SÁ SANCHEZ

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

Orientadores: Prof. Dr. César Marques Salgado

Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade

Rio de Janeiro

2019

SANCHEZ, J. S., Juliana de Sá Sanchez

Potencial Influência de Variações na Estabilidade Atmosférica e na Superfície do Solos Sobre o Risco Radiológico Ambiental/ Juliana de Sá Sanchez. Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2018.

Orientadores: César Marques Salgado e Edson Ramos de Andrade

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2019

1. Meio ambiente. 2. Contaminação. 3. Coeficiente de rugosidade do solo. 4. Risco.

**POTENCIAL INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES NA ESTABILIDADE
ATMOSFÉRICA E NA SUPERFÍCIE DO SOLO SOBRE O RISCO
RADIOLÓGICO AMBIENTAL**

JULIANA DE SÁ SANCHEZ

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

Aprovada por:

César Marques Salgado, D.Sc

Edson Ramos de Andrade, D.Sc

Claudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc

Tercio Brum, D.Sc

Sergio Gavazza, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2019

**A Deus, que está
sempre presente.**

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer aos que fazem parte desta conquista.

Primeiramente, agradeço a Deus que me deu sabedoria em toda trajetória;

Aos meus pais, pelo suporte mesmo à distância;

Aos meus orientadores Edson Ramos de Andrade e César Marques Salgado, por acreditarem no meu potencial. Obrigada pela paciência e ensinamentos;

Ao Rodrigo, pelo companheirismo e cumplicidade;

Ao Edson, por me apresentar Ilusões e Fernão Capelo Gaivota.

Aos meus chefes e amigos Ubiratan Oliveira e André Funcke, por todo apoio, incentivo, palavras positivas, ombro amigo. Obrigada pela amizade e credibilidade em todos os momentos;

À minha irmã Mari, por ser minha irmã;

Às queridas, Ana Lúcia, Nilséia e Renata Funcke, por todos os bons momentos compartilhados;

Aos amigos do IEN, em especial, Frederico, Gustavo, Andressa, Leila e Carlinha. Vocês tornaram essa jornada mais leve;

Aos amigos do IME, Cláudio e Raphael. A palavra “superação” se tornou incomum entre nós. Vencemos todos os obstáculos. Nós conseguimos. Juntos. Foi uma experiência ímpar.

Aos senhores Domingos, Cel. Walter, Cel. Gavazza e De Andrade. Serei sempre grata por cada lição. Aprendi a ser mais forte e disciplinada. Muito obrigada.

A todos os meus sinceros agradecimentos

Supere o espaço e tudo o que nos sobra é o aqui.
Supere o tempo e tudo o que nos resta é o agora.
(Richard Bach)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
OBJETIVOS	16
Objetivo Geral	16
Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Radiação Ionizante	17
2.2 Diretrizes básicas de proteção radiológica	18
2.3 Exposição do público	18
2.4 Potenciais efeitos da radiação aos indivíduos expostos neste cenário	19
2.4.1 Efeitos Determinísticos	19
2.4.2. Efeitos Estocásticos	19
2.4.3. Síndrome Aguda da Radiação	20
2.5 Contextualização de RISCO para o eventual cenário	21
2.6 FGR 13 (Federal Guidance Report N 13).....	21
2.6.1 Coeficiente de risco para exposição externa	21
2.7 Radioisótopo Césio 137	22
2.8 Rugosidade do solo e superfícies.....	23
2.8.1 Estimativa do Coeficiente de Rugosidade do solo e superfícies	24
2.9 Modelo de Dispersão Atmosférica Gaussiana	29
2.10 Camadas de Mistura e Efeitos do perfil de Temperatura Vertical para diferentes classes de Estabilidade Atmosférica	31
2.11 HotSpot	33
2.11.1 Definições dos parâmetros de entrada do código HotSpot Health Physics utilizados para este cenário	33
3. METODOLOGIA	42
3.1 Cenário de Exposição	42
3.2 Parâmetros de entrada utilizados na simulação	43
3.3 Estimativa das doses efetivas totais (TED) e taxas de dose de radiação 51	
3.4 Estimativa de risco	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53

4.1	Estimativa do valor máximo da Dose Efetiva Total (TED) em função dos seis coeficientes de rugosidade do e das Classes PG (A-F)	53
4.2	Avaliação da influência das Classes PG (A-F) em cada limite de interesse (interno, médio, externo)	55
4.3	Cálculo da taxa de dose de radiação em função das distâncias e dos coeficientes de rugosidade do solo para cada Classe PG (A-F).....	58
4.4	Estimativa do risco em função dos coeficientes de rugosidade do solo e das distâncias para cada Classe PG (A-F)	63
5.	CONCLUSÃO	67
6.	PERSPECTIVAS FUTURAS	68
7.	REFERÊNCIAS	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Potenciais efeitos da radiação aos indivíduos expostos neste cenário.....	19
Figura 2: Decaimento do radioisótopo Césio-137.	23
Figura 3: Forma, ondulação e rugosidade de uma superfície	24
Figura 4: Comprimentos para avaliação dos coeficientes de rugosidade de superfície do terreno.....	25
Figura 5: Rugosidade média (RM)	26
Figura 6: Altura máxima do pico (AmP)	26
Figura 7: Profundidade máxima do vale (PmV)	27
Figura 8: Altura máxima do perfil de rugosidade (AmR).....	28
Figura 9: Altura total do perfil de rugosidade (A _t R).....	28
Figura 10: Modelo de Dispersão Atmosférica Gaussiana	30
Figura 11: Camadas Limites	31
Figura 12: Modelo adotado para a liberação de um RDD	45
Figura 13: Termo-fonte	46
Figura 14: Classes de Estabilidade Atmosférica	47
Figura 15: Posição dos receptores em relação à fonte	48
Figura 16: Caracterização do terreno padrão	50
Figura 17: Resultados de saída/Output	51
Figura 18: Valor máximo da Dose Efetiva Total (TED) em função dos coeficientes de rugosidade do solo e das Classes PG (A-F).....	54
Figura 19: Distâncias em que a TED excede os limites definidos (inner 100mSv, middle 20mSv e outer 1mSv) considerando cada Classe PG (A-F)	57
Figura 20: Taxa de dose de radiação Sv/h em função das distâncias [km] e coeficientes de rugosidade do solo [cm] para cada Classe (A-F)	61
Figura 21: Estimativa do risco em função dos coeficientes de rugosidade do solo e das distâncias para cada Classe PG (A-F).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da SAR em função da dose de radiação	20
Tabela 2: Profundidade das camadas de mistura	33
Tabela 3: Fator exponencial usado pelo HotSpot para calcular a variação da velocidade do vento com a altura	36
Tabela 4: Direção e coordenadas do vento	36
Tabela 5: Condições de Estabilidade Atmosférica e Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno padrão	37
Tabela 6: Coeficiente de rugosidade do solo para diferentes superfícies	38
Tabela 7: Parâmetros de entrada	44
Tabela 8: Dose Efetiva Total Máxima (TED máx.)	54
Tabela 9: Limites excedidos pela TED (inner, middle, outer)	56
Tabela 10: Estimativa das taxas de dose na Classe A	58
Tabela 11: Estimativa das taxas de dose na Classe B	59
Tabela 12: Estimativa das taxas de dose na Classe C	59
Tabela 13: Estimativa das taxas de dose na Classe D	59
Tabela 14: Estimativa das taxas de dose na Classe E	60
Tabela 15: Estimativa das taxas de dose na Classe F	60
Tabela 16: Estimativa do risco no ponto A	63
Tabela 17: Estimativa do risco no ponto B	63
Tabela 18: Estimativa do risco no ponto C	64
Tabela 19: Estimativa do risco no ponto D	64
Tabela 20: Estimativa do risco no ponto E	64
Tabela 21: Estimativa do risco no ponto F	65

RESUMO

A liberação de material radioativo no meio ambiente por um dispositivo de dispersão radiológica (RDD) é um evento complexo, podendo haver consequências desastrosas para a saúde humana e meio ambiente. Considerou-se a liberação de um RDD para o cenário associando as consequências das variações das classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford (Classes PG) e características da superfície do solo do terreno. Este estudo foi desenvolvido por meio da modelagem de um cenário radiológico caracterizado pelo desencadeamento de um RDD, buscando correlações entre o risco gerado pela exposição ao meio ambiente contaminado e determinadas características ambientais. As Classes PG, a rugosidade do solo e diferentes distâncias, foram escolhidas como parâmetros de avaliação. A simulação foi realizada usando o pacote de software HotSpot para modelar o cenário a partir de uma perspectiva gaussiana, conduzindo uma abordagem conservativa. Os resultados indicam tanto a influência dos parâmetros estudados no risco quanto a existência da relação de afinidade entre eles no processo. Além disso, tal abordagem permite avaliar prontamente mecanismos externos para monitorar o risco radiológico. Portanto, uma estimativa dos resultados sugere que os parâmetros podem ser combinados para aumentar significativamente o impacto da pluma de radiação, causando mudanças repentinas na percepção de risco, bem como resposta e ações de proteção.

ABSTRACT

The release of radioactive material into the environment by a radiological dispersion device (RDD) is a complex event, with potentially disastrous consequences for human health and the environment. The release of an RDD was considered for the scenario associating the consequences of the variations of the classes of air stability of Pasquill-Gifford (Classes PG) and characteristics of the surface of the ground of the land. This study was developed through the modeling of a radiological scenario characterized by the development of an RDD, seeking correlations between the risk generated by the exposure to the contaminated environment and certain environmental characteristics. The PG classes, soil roughness and different distances were chosen as evaluation parameters. The simulation was performed using the HotSpot software package to model the scenario from a Gaussian perspective, leading to a conservative approach. The results indicate both the influence of the studied parameters on the risk and the existence of the affinity relation between them in the process. In addition, such an approach allows prompt assessment of external mechanisms to monitor radiological risk. Therefore, an estimation of the results suggests that the parameters can be combined to significantly increase the impact of the radiation plume, causing sudden changes in the perception of risk as well as response and protective actions.

1. INTRODUÇÃO

A liberação de um material radioativo para o meio ambiente, varia no tempo, espaço, em função de fatores meteorológicos, como velocidade do vento, turbulência mecânica, e das características do terreno do eventual cenário. Esses eventos são estudados no contexto da avaliação de consequências para o meio ambiente e indivíduos expostos considerando as características do material contaminante e o período em que foi liberado.

As doses de radiação próximo ao local da liberação podem ser muito altas, e as principais medidas de proteção aplicadas sobre a população potencialmente afetada são a evacuação e a abrigagem dos indivíduos expostos (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002). O material radioativo liberado, pode ser depositado no solo após a passagem da pluma de contaminação, e as características do terreno podem influenciar a taxa de dose de radiação da superfície do solo (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 apud UNDERWOOD, 1987). A deposição de material radioativo em superfícies de áreas rurais é de importante estudo, tanto do ponto de vista da dose de radiação para as populações rurais, como por seu impacto na contaminação de alimentos, sejam estes vegetais cultivados nas áreas contaminadas ou produtos derivados de animais criados ou nutridos com alimentos cultivados nestas áreas (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002).

Algumas medidas de intervenção para os indivíduos expostos devem ser consideradas, adotando ações com o objetivo de reduzir ou evitar a exposição. Sua aplicação depende do tipo de área contaminada e da concentração de radioisótopos depositados.

O processo de decisão para as medidas de intervenção em um ambiente contaminado por material radioativo pode se tornar mais complexo se a liberação for realizada por um dispositivo de dispersão radiológica (*Radiological Dispersive Device - RDD*), que pode ser definido como qualquer dispositivo causador de espalhamento deliberado de material radioativo, por meio de explosão convencional (REMM, 2019).

Os potenciais isótopos que podem ser usados em um cenário RDD são ^{241}Am , ^{252}Cf , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{238}Pu , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{90}Sr . (REMM, 2019). São considerados assim pela eventual portabilidade, possível obtenção de forma

ilícita, alto nível de radioatividade, formas física e química propícias em causar danos a populações em liberações públicas (REMM, 2019). Tal dispositivo usa a energia de explosivos convencionais para liberar uma quantidade significativa de material radioativo (REMM, 2019), formando uma pluma de contaminação sobre uma determinada área. Esta área pode variar em tamanho e forma, dependendo das condições de estabilidade atmosféricas locais e da morfologia do solo, para diferentes coeficientes de rugosidade, que também fazem parte do contexto a ser investigado (JOHN E. TILL E HELLEN A. GROGAN, 2008).

Este estudo considera as condições atmosféricas, segundo as Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford (Classes PG), representando um papel determinante no transporte do material radioativo no eventual cenário (HOMANN, 2013), enquanto a morfologia do solo é inferida a partir da rugosidade dos perfis de terreno. Um evento dispersivo radiológico é normalmente modelado como dependente principalmente do termo-fonte e das condições climáticas (JOHN E. TILL E HELLEN A. GROGAN, 2008). No entanto, existem também estudos que incluem a rugosidade do solo como um parâmetro adicional, capaz de alterar significativamente os perfis de acumulação no solo (HOMANN, 2013). Tais mudanças podem influenciar o perfil da taxa de dose para aqueles sob exposição potencial, impactando na avaliação final do risco radiológico (HOMANN, 2013).

O uso do modelo gaussiano, que estima a concentração do material contaminante em determinado ponto do cenário (ARAÚJO, O. M, 2015) garante que as soluções de primeira ordem, aquelas decorrentes de situações de emergência (CNEN-NE-3.01, 2014), sejam conservativas, estimando as condições mais graves, sugerindo que as previsões baseadas nelas são superestimadas, considerando um terreno padrão, o que é interessante para uma resposta e decisão iniciais.

O radionuclídeo Césio-137 foi considerado a maior ameaça radiológica neste estudo, pois pode causar exposições a longo prazo por meio da exposição externa pela deposição do solo e em outras superfícies terrestres (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 APUD UNSCEAR, 2000).

O *HotSpot Health Physics Codes 3.1*, foi utilizado para a modelagem do eventual cenário, fornecendo a estimativa dos efeitos da radiação ionizante quando materiais radioativos são liberados para a atmosfera e depletados no

solo, considerando neste caso, a origem da dispersão localizada ao nível do solo, com as coordenadas de liberação do radionuclídeo em $(x = 0, y = 0, z = 0)$ (HOMMAN, 2013). O código possibilita por meio dos resultados a resposta de emergência, permitindo a avaliação de técnicos e planejadores o acesso a um conjunto portátil de ferramentas computacionais (HOMMAN, 2013).

1.1. OBJETIVOS

1.1.2. Objetivo Geral

Avaliar a liberação do Césio-137 em um cenário RDD hipotético, e estimar o risco de Síndrome Aguda da Radiação (SAR) causada pela exposição de indivíduos, considerando as variações das Classes de Estabilidade Atmosférica de Pasquill-Gifford (Classes PG) e dos coeficientes de rugosidade do solo a diferentes distâncias, por meio de modelagem computacional utilizando o software *HotSpot Health Physics*.

1.1.3 Objetivos Específicos

- a) Estimar o valor máximo da Dose Efetiva Total (TED) em função dos seis coeficientes de rugosidade do solo (3 cm, 10cm, 20cm, 40cm, 80cm e 160cm) e das Classes PG (A-F);
- b) Avaliar a influência das Classes PG (A-F) em cada limite das plumas de contaminação (interno, médio, externo) da Dose Total Efetiva (TED);
- c) Calcular a taxa de dose de radiação em função das distâncias e dos coeficientes de rugosidade do solo para cada Classe PG (A-F), e
- d) Estimar o risco para desenvolvimento da Síndrome Aguda da Radiação (SAR) em função da taxa de dose proveniente da superfície do solo considerando o valor de referência de 0,7 Sv, em função do tempo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para este trabalho, foi utilizado na simulação do eventual cenário RDD o Césio-137 como material radioativo, pois apresenta-se na forma de Cloreto de Césio, é bastante solúvel em água e possui alto grau de contaminação ambiental (ATSDR, 2004).

O Césio-137 é semelhante ao potássio no metabolismo humano, apresentando alta capacidade de contaminação interna (ATSDR, 2004). Pode ser encontrado em irradiadores industriais e equipamentos de radioterapia (ATSDR, 2004). O isótopo radioativo de Césio-137 é considerado em eventuais acidentes de dispersão radiológica atmosférica, um dos responsáveis pela maior parte da exposição à radiação recebida pela população em geral, devido à irradiação externa proveniente da deposição no solo (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 APUD UNSCEAR, 2000).

A exposição de indivíduos em um cenário RDD está associada à liberação de dispositivos que emitem radiações ionizantes, acarretando riscos. A consciência e o conhecimento desses riscos estimados podem levar a redução dos danos. (CNEN-NE-3.01, 2014).

A importância de cada via de exposição varia com a composição de radionuclídeos no material liberado, com as características do ambiente afetado pela deposição e com o uso da área pela população (HOMANN, 2013).

2.1. Radiação Ionizante

As radiações ionizantes são caracterizadas por sua capacidade de excitar e ionizar átomos de matéria com os quais elas interagem. Esta interação da radiação com uma determinada superfície pode remover elétrons de seus orbitais, resultando em elétrons livres de alta energia, íons positivos ou radicais livres (ATTIX, 1986).

As radiações que possuem carga, como partículas beta (β), partículas alfa (α) e fragmentos de fissão, transferem sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo. São denominadas radiações diretamente ionizantes. As radiações que não possuem carga, como os raios x, λ e os nêutrons, interagem

transferindo sua energia para elétrons, podendo provocar novas ionizações. São denominadas radiações indiretamente ionizantes (CNEN, 2015).

Considerando que o corpo humano é composto principalmente por átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, quando exposto à radiação, possivelmente as células tendem a sofrer danos que poderão ser mensurados em função da exposição do indivíduo em um eventual cenário de contaminação. Para o entendimento dos possíveis danos da exposição do público à radiação, é compreendida a norma 3.01 da CNEN, assim como, os potenciais efeitos são tratados como consequência desta exposição envolvendo diversas variáveis probabilísticas (CNEN-NE-3.01, 2014).

2.2. Diretrizes básicas de proteção radiológica

A norma (CNEN-NE-3.01, 2014), estabelece os requisitos básicos de proteção radiológica e se aplica às práticas, incluindo todas as fontes associadas a essas práticas, assim como a intervenções, abrangendo todas as atividades que envolvem exposição à radiação.

2.3. Exposição do público

A norma (CNEN-NE-3.01, 2014), recomenda que o titular de uma determinada fonte deve estabelecer, implementar e manter medidas para:

- a) assegurar a aplicação da otimização da proteção radiológica para indivíduos do público cuja exposição seja atribuível a tais fontes, considerando as restrições de dose para o grupo crítico relevante, estabelecidas pela CNEN;
- b) garantir a segurança dessas fontes, tomando todas as medidas necessárias para prevenir falhas e erros que possam resultar em exposição acidental do público, ou para minimizar as suas consequências;
- c) estimar a exposição do público, incluindo, quando aplicável, programa de monitoração radiológica ambiental;
- d) garantir resposta adequada a situações de emergências radiológicas que possam envolver exposição do público, incluindo planos ou procedimentos de emergência em consonância com a natureza e a intensidade do risco envolvido.

2.4. Potenciais efeitos da radiação aos indivíduos potencialmente expostos neste cenário

Ao avaliar os potenciais efeitos para a saúde a partir da exposição à materiais radioativos, é importante compreender eventos de natureza probabilística. Os efeitos da exposição à radiação dividem-se em duas classes principais: efeitos determinísticos e efeitos estocásticos, conforme demonstrado na figura 1 (CNEN, 2015).



Figura 1: Potenciais efeitos da radiação aos indivíduos expostos neste cenário

Fonte: A autora, a partir de dados da CNEN, 2015

2.4.1. Efeitos Determinísticos

No efeito determinístico, existe um limiar de dose absorvida necessário para sua ocorrência, cuja gravidade aumenta proporcionalmente à dose de radiação (CNEN, 2014 NN 3.01), ou seja, a relação entre o limiar de dose e o dano é proporcional. A severidade do dano caracteriza o efeito quando o limiar de dose suportado pelas células é ultrapassado, podendo resultar na Síndrome Aguda da Radiação (CNEN, 2015. "RADIAÇÕES IONIZANTES E A VIDA").

2.4.2. Efeitos Estocásticos

Esse tipo de efeito pode ser induzido por qualquer dose, até mesmo a radiação natural, não existindo um limiar para a sua ocorrência. Os efeitos estocásticos são sempre tardios e a probabilidade de ocorrência é uma função da dose (CNEN, 2014 NN 3.01).

2.4.3. Síndrome Aguda da Radiação

A Síndrome Aguda da Radiação (SAR), é uma doença que pode ocorrer quando indivíduos são expostos a níveis muito altos de radiação, durante um curto período de tempo de até alguns dias. A SAR pode ser definida como um grupo de sintomas que caracterizam um quadro clínico produzido pela exposição do corpo inteiro, ou grande parte do corpo, a radiação ionizante em curto período de tempo, usualmente minutos (OKUNO, E., 2013).

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica em seu relatório nº 18 (ICRP 18) definiu dose limiar como sendo a dose estimada que causa incidência de reações teciduais em 1% dos tecidos irradiados (ICRP 118, 2012). Os efeitos de uma radioexposição em indivíduos podem ser mensurados para diferentes limiares de dose conforme mostrado na tabela 1 (CNEN, 2015).

Tabela 1: Variação da SAR em função da dose de radiação

FORMA	DOSE ABSORVIDA	SINTOMAS
Infraclínica	Inferior à 1Gy	Ausência de sintomas na maioria dos indivíduos
Reações leves	1 à 2 Gy	Náuseas, vômitos (3 à 6 horas após a exposição)
Hematopoiética leve	2 à 4 Gy	Função medular atingida
Hematopoiética grave	4 à 6 Gy	Função medular gravemente atingida
Gastrointestinal	6 à 7 Gy	Diarreia, vômitos, hemorragia (morte em 5 ou 6 dias)
Pulmonar	8 à 9 Gy	Insuficiência respiratória aguda, coma e morte entre 14 e 36 horas
Cerebral	Superior à 10 Gy	Morte em poucas horas por colapso

Fonte: Adaptado de CNEN, 2015.

2.5 Contextualização do RISCO

O processo de gestão de riscos pressupõe a avaliação dos efeitos probabilísticos sobre os indivíduos expostos, ou seja, o que pode acontecer, por que, com que probabilidade e que magnitude de consequências, o que determina o nível de risco (IBGE, 2018).

A ABNT (2009) define o Risco como termos de uma combinação de consequências de um evento e a probabilidade de ocorrência associada. A saída do processo de avaliação de riscos é uma entrada para os processos de tomadas de decisão por parte dos responsáveis (MARIA LUIZA C. MARTINS, JANAINA T.G.S.B. DE OLIVEIRA, 2012 apud ABNT, 2009).

2.6 FGR 13 (*Federal Guidance Report N° 13*)

O Relatório de Orientação Federal número 13 (FGR 13, 1999) evidencia diversos fatores para a estimativa de risco de câncer provenientes à exposição de material radioativo. Estes fatores são compreendidos em (a) exposição externa por submersão no ar contaminado; (b) exposição externa por contaminação da superfície do solo; (c) exposição externa do solo contaminado a grande profundidade.

O coeficiente de risco para indivíduos expostos a um material radioativo estima a probabilidade de mortalidade ou morbidade por unidade de atividade inalada ou ingerida, para exposição interna, ou por unidade de concentração de atividade integrada ao tempo no ar ou no solo, para exposição externa (FGR 13, 1999).

2.6.1. Coeficiente de risco para exposição externa

O coeficiente de risco para exposição externa pode ser compreendido em três cenários distintos:

- a) Exposição externa por submersão no ar contaminado (FGR 13, 1999).

A exposição externa por submersão é expressa como o risco de mortalidade por câncer ou morbidade por unidade de exposição integrada a um radionuclídeo no ar.

b) Exposição externa por contaminação da superfície e profundidade do solo (FGR 13, 1999).

A taxa de dose oriunda do solo contaminado a uma profundidade maior que 15 cm geralmente difere apenas de 0-20% das taxas de dose a maiores profundidades. Esse fenômeno ocorre devido à blindagem proveniente do solo quando a concentração se encontra a uma profundidade maior que 15 cm (EPA, 1993 apud FGR 13, 1999). Como os coeficientes de risco para exposição externa do solo contaminado a 15 cm diferem ligeiramente a uma profundidade muito maior, tende a ser constante o risco a maiores profundidades.

Esta constatação explica a concentração de Césio-137 em 10 campos não cultivados do sul da Inglaterra. A atividade específica variou de 0 a $946 \left[\frac{pCi}{Kg} \right]$, com os níveis mais altos contidos nos 10 cm superiores da superfície do solo (ATSDR, 2004 apud OWENS ET AL. 1996).

2.7. Radioisótopo Césio-137

O Césio-137 é um metal alcalino, macio e dúctil (ATSDR, 2004). Em comparação aos outros metais alcalinos, é muito mais reativo. Se inflama quando exposto ao ar, produzindo uma chama violeta avermelhada, formando uma mistura de óxidos de Césio. Reage com água resultando em hidróxido de Césio. Pode produzir uma explosão, quando em chamas inflama o gás hidrogênio liberado. Os sais de césio e a maioria dos compostos de césio são geralmente muito solúveis em água (ATSDR, 2004).

O Césio-137 tem uma meia-vida radioativa de 30 anos e decai por decaimento beta tanto para Bário-137 estável como para uma forma metaestável de bário (^{137m}Ba). O isótopo metaestável (^{137m}Ba) é rapidamente convertido em ^{137}Ba estável (meia-vida de cerca de 2 minutos) acompanhado por emissão de raios gama cuja energia é de 0,662 MeV (ATSDR, 2004 apud ICRP 1983). O

primeiro modo de decaimento beta que forma ^{137m}Ba é responsável por aproximadamente 95% da intensidade total, enquanto o segundo modo é responsável por cerca de 5% (ATSDR, 2004 apud WHO, 1983).

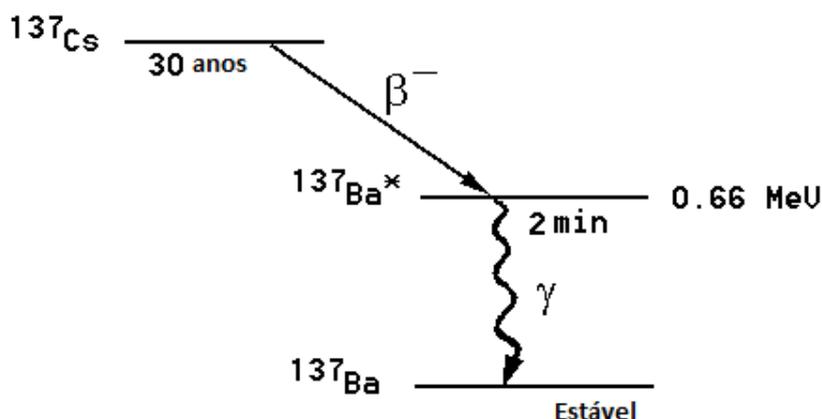


Figura 2: Decaimento do radioisótopo Césio-137.

Fonte: Adaptado de (ATSDR, 2004)

2.8 Rugosidade do solo e superfícies

A rugosidade superficial do solo, refere-se às diferenças nas medidas de alturas na superfície do solo em distâncias relativamente pequenas. A rugosidade é utilizada em equações de predição de erosão hídrica e eólica e tem aplicação em hidrologia, agroclimatologia e outras áreas do conhecimento (ZOBECK E POPHAM, 1997 apud ELÓI PANACHUKI, 2008).

O microrrelevo do solo associa-se com processos de transferência por meio do limite de separação solo-atmosfera. Pode-se destacar entre estes principais processos de transferência, o armazenamento de água nas microdepressões, infiltração de água no solo, escoamento superficial, fragmentação dos agregados pela ação da água e do vento, trocas gasosas, evaporação e fluxo de calor. (HUANG E BRADFORD, 1992 apud ELÓI PANACHUKI, 2008).

A rugosidade do solo é caracterizada em função das irregularidades da superfície que de forma geral não pode ser detectada por métodos topográficos convencionais. Sendo assim, diferentes granulometrias influenciam no

microrrelevo do solo. Segundo (ROMKENS E WANG, 1986 apud ELÓI PANACHUKI, 2008), diferentes tipos de rugosidades representam uma diferente ordem de magnitude, podendo refletir na variação do relevo do solo.

2.8.1. Estimativa do Coeficiente de Rugosidade do solo e superfícies

A superfície de um terreno ou de uma estrutura urbana é dividida de forma que se possa compreender e estimar o coeficiente de rugosidade de uma determinada região (JOSSO, BRUNO; BURTON, DAVID R.; LALOR, MICHAEL J, 2002).

Os parâmetros para a identificação desse coeficiente podem ser compreendidos em forma, ondulação e rugosidade, conforme figura 3. Considera-se forma a componente mais grosseira; as ondulações são estruturas ainda menores que representam os picos e vales da rugosidade da superfície, visto que não pode ser detectada por métodos topográficos convencionais (JOSSO, BRUNO; BURTON, DAVID R.; LALOR, MICHAEL J, 2002).

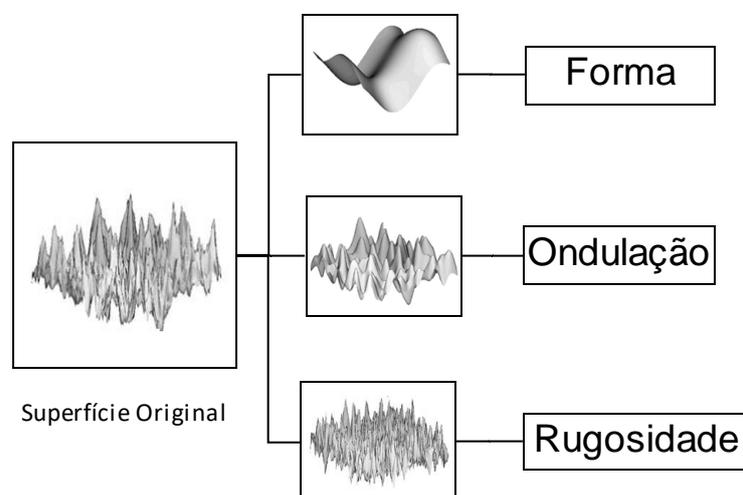


Figura 3: Forma, ondulação e rugosidade de uma superfície

Fonte: A autora, a partir de dados do JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, 2002

Para estimar o coeficiente de rugosidade, que está diretamente relacionado à forma e ondulação de uma determinada região, a área medida do terreno denominada Comprimento de Medição é dividida em sub-regiões, denominadas comprimento de Amostragem (LA). A linha média para o perfil é calculada, onde as áreas dos picos (acima e abaixo) são iguais, conforme mostrado na figura 4. As equações abaixo embasam a definição de rugosidade de superfície e representam um dos métodos para estimar o coeficiente de rugosidade do solo. Outros modelos algébricos podem ser considerados.

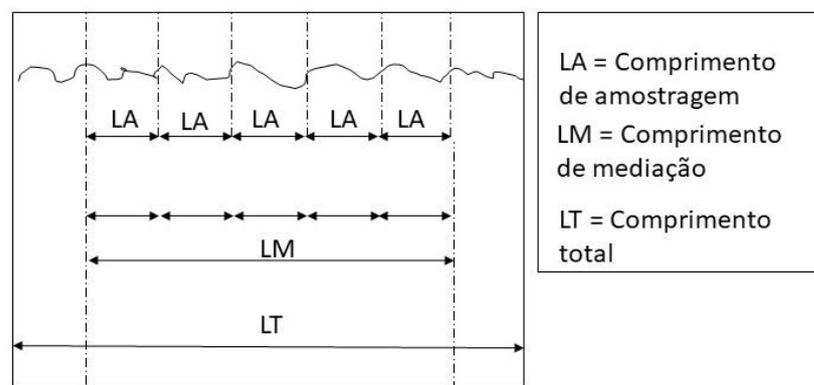


Figura 4: Comprimentos para avaliação dos coeficientes de rugosidade de superfície do terreno

Fonte: A autora, a partir de dados do JOSSO, BRUNO; BURTON, DAVID R.; LALOR, MICHAEL J, 2002

A partir dos parâmetros observados na figura 4, torna-se possível estimar as medidas necessárias para representar o coeficiente de rugosidade de uma determinada superfície. Dentre elas, pode-se citar:

- i) rugosidade média (RM)
- ii) altura máxima do pico ($A_m P$),
- iii) profundidade máxima do vale ($P_m V$),
- iv) altura máxima do perfil de rugosidade ($A_m R$),
- v) altura total do perfil de rugosidade ($A_t R$).

i) Rugosidade média (RM)

A rugosidade média (RM) é avaliada na superfície projetada abaixo da linha média dos picos e vales superiores e acima da linha média dos picos e vales inferiores, conforme figura 5.

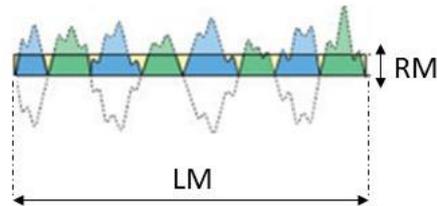


Figura 5: Rugosidade média (RM)

Fonte: A autora, a partir de dados do JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, 2002

Estima-se a rugosidade média (RM) conforme a equação 1:

$$RM = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (1)$$

onde:

Z, representa a altura de um determinado perfil de rugosidade, podendo ser de picos ou vales

ii) Altura máxima de pico (A_mP)

A altura máxima de pico (A_mP) representa a maior altura do pico ao longo do comprimento de medição (LM). É calculada em relação à linha média, conforme figura 6.

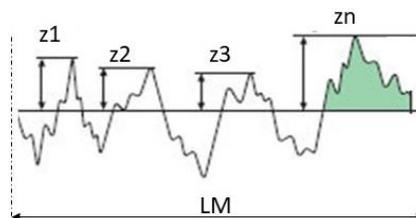


Figura 6: Altura máxima do pico (A_mP)

Fonte: A autora, a partir de dados do JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, 2002

Estima-se a altura máxima de pico (A_mP) conforme a equação 2:

$$A_mP = \frac{1}{l} \max(Z(x)) \quad (2)$$

iii) Profundidade máxima do vale (P_mV)

Semelhante à altura máxima de pico (A_mP), a profundidade máxima do vale (P_mV) representa a maior altura do pico ao longo do comprimento de medição (LM). É calculada abaixo da linha média, conforme figura 7.

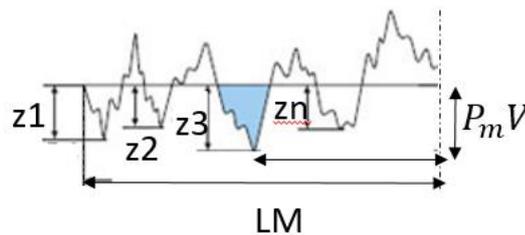


Figura 7: Profundidade máxima do vale (P_mV)

Fonte: A autora, a partir de dados do JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, 2002

Estima-se a profundidade máxima do vale (P_mV) conforme a equação 3:

$$P_mV = \min(Z(x)) \quad (3)$$

iv) Altura máxima do perfil de rugosidade (A_mR)

A altura máxima do perfil de rugosidade (A_mR) é a soma da profundidade máxima do vale (P_mV) e da altura máxima do pico (A_mP) ao longo do comprimento de medição LM, conforme figura 8.

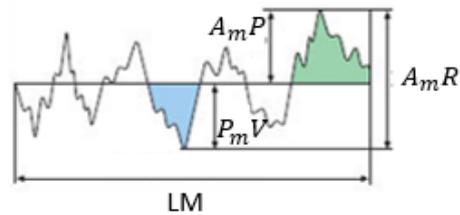


Figura 8: Altura máxima do perfil de rugosidade (A_mR)

Fonte: A autora, a partir de dados de JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, 2002

Estima-se a altura máxima do perfil de rugosidade (A_mR) conforme a equação 4:

$$A_mR = A_mP + P_mV \quad (4)$$

v) Altura total do perfil de rugosidade (A_tR)

Na altura total do perfil de rugosidade (A_tR), a profundidade máxima do vale (P_mV) e a altura máxima do pico (A_mP), pertencem a uma região de amostragem (LA) especificamente, e não a todo o comprimento de medição (LM), conforme figura 9.

Os picos e vales máximos devem pertencer a uma região de amostragem (LA).

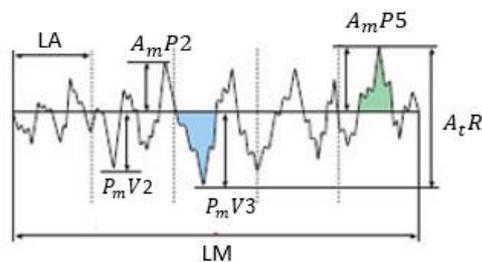


Figura 9: Altura total do perfil de rugosidade (A_tR)

Fonte: A autora, a partir de dados do JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, 2002

Estima-se a altura total do perfil de rugosidade (A_tR) a soma da profundidade máxima do vale (P_mV) e da altura máxima de pico (A_mP) conforme a equação 5:

$$A_tR = A_mP_2 + P_mV_2 \quad (5)$$

2.9. Modelo de Dispersão Atmosférica Gaussiana

O modelo de pluma Gaussiana estima a concentração do poluente em determinado ponto do cenário (ARAÚJO, O. M, 2015). A velocidade do vento é considerada constante e a turbulência homogênea. Tem como principal aplicação os fins regulatórios e é um dos modelos de dispersão de poluentes mais utilizado. É obtido da equação de advecção-difusão em eventuais cenários postulados. As concentrações de poluentes são estimadas a partir da equação de conservação de massa. Tem como vantagem a obtenção das concentrações de poluentes mais facilmente, exigindo uma quantidade menor de dados meteorológicos (TADANO, YARA DE SOUZA, 2012).

O processo de dispersão pode ser considerado a partir do momento em que a pluma sai da chaminé, é elevada em função da sua temperatura e da temperatura ambiente (essa diferença de temperatura causa empuxo), e a velocidade de saída. Ao entrar em contato com a atmosfera, a pluma é dispersada em função dos parâmetros meteorológicos, como velocidade e direção do vento, temperatura, classes de estabilidade atmosférica, turbulência, características topográficas, etc. O resultado estimado estará de acordo com processo de advecção pelo vento, ou seja, o transporte do material contaminado para onde o vento está soprando, e de difusão turbulenta, ou seja, abertura horizontal e vertical da pluma (ENVEX E SIMILAR, 2009). Este fenômeno pode ser representado pela equação 6 usada pelo código HotSpot.

$$X(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (6)$$

onde

$X(x, y, z, H)$ = É a concentração esperada do contaminante na coordenada (x, y, z, H) [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$];

(x, y, z, H) = São as coordenadas cartesianas ou espaciais do ponto onde se deseja estimar a concentração do contaminante [m];

Q = quantidade de contaminante lançada pela fonte de emissão [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$];

H = altura efetiva do lançamento;

u = velocidade média do vento na direção do escoamento (x) e a medida no topo da chaminé [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

σ_y = Desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção perpendicular ao vento [m];

σ_z = Desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical [m];

λ = Constante de decaimento radioativo [s^{-1}];

y = Distância na direção perpendicular ao vento [m];

Z = Distância no eixo vertical [m];

$DF(x)$ = Fator de depleção da pluma;

x = Distância na direção do vento [m]

A “abertura” da pluma causa uma distribuição normal de concentração a partir da linha de centro da pluma, como pode ser observado na figura 10. A altura efetiva do lançamento H é representada pela soma da ascensão da pluma, que é a altura de elevação da pluma em relação ao topo da chaminé (Δh), e pela altura geométrica da chaminé, que é a altura física da chaminé (h) de liberação do contaminante (ENVEX E SIMILAR, 2009).

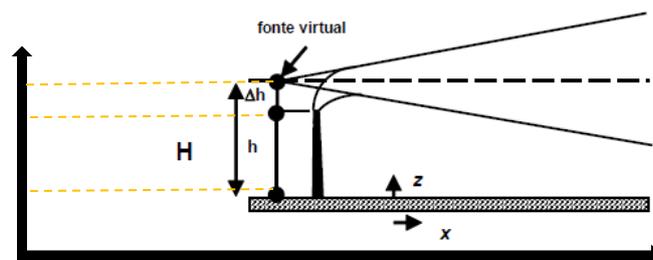


Figura 10: Modelo de Dispersão Atmosférica Gaussiana

Fonte: A autora, a partir de dados do ENVEX E SIMILAR, 2009

2.10 Camadas de Mistura e Efeitos do perfil de Temperatura Vertical para diferentes classes de Estabilidade Atmosférica

As camadas determinadas pelo perfil de temperatura absoluta média dividem a atmosfera terrestre que pode ser classificada em: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera.

Quando poluentes são emitidos próximos à superfície terrestre, são transformados e dispersos dentro da camada limite denominada Troposfera, que é a camada mais baixa da atmosfera terrestre. Nesta camada, a temperatura é proporcional à altura, onde os processos de convecção (transferência de calor por meio do movimento vertical do ar) e advecção (transferência de calor através do movimento horizontal do ar) mantêm esta região bem misturada (LEMMA, 2004). Pode-se observar as camadas limites conforme a figura 11.

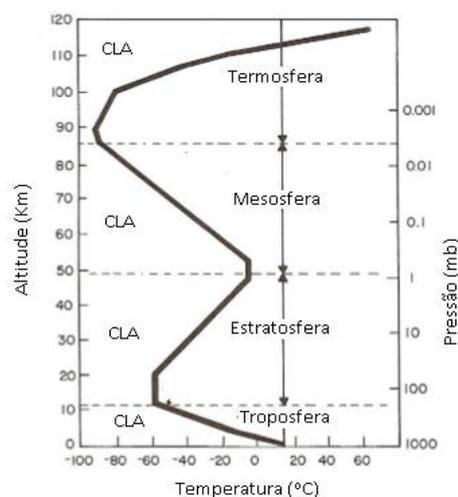


Figura 11: Camadas Limites

Fonte: A autora, a partir de dados do LEMMA, 2004

Na Camada Limite Atmosférica (CLA) ocorrem as trocas de momento entre o solo e a atmosfera, calor e vapor de água, influenciando-a. Os fatores externos que induzem as trocas entre a atmosfera e a superfície são atrito com a superfície (rugosidade do solo), evaporação, transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações no escoamento influenciadas pela

topografia. Ocorre o fenômeno de turbulência na CLA que é fundamental para o transporte de massa, calor e momento entre o solo e atmosfera.

O parâmetro de dispersão vertical (σ_z), representa a troca de turbulência na altura da camada de mistura. A troca de turbulência é mantida constante ao atingir o valor máximo de dispersão vertical.

A relação entre a altura da camada de mistura h_{mis} e a dispersão vertical máxima ($\sigma_{z\ máx}$) pode ser representada conforme a equação 7 (ARAÚJO, O. M, 2015 apud RADIATION PROTECTION DIVISION, 2002):

$$\sigma_{z\ máx} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} h_{máx} \approx 0,8 h_{mis} \quad (7)$$

A estrutura vertical da CLA está relacionada ao equilíbrio entre os diferentes processos de troca térmica, apresentando um gradiente de temperatura positivo (para cima) ou negativo (para baixo), o que determina o movimento turbulento na atmosfera.

Durante um dia quente de verão, com poucas nuvens, a profundidade da camada de mistura pode variar alguns quilômetros, pois a superfície terrestre quando é aquecida, transfere calor para as camadas superiores, visto que a temperatura diminui até a porção média da camada de mistura. Já no período noturno, a variação da camada de mistura é menor, atingindo alguns metros. Esta troca do ar quente com o ar frio é denominada corrente de convecção. Pouco antes do pôr-do-sol, o fluxo vertical de calor (para cima) que ocorria na camada instável de mistura é substituído por um fluxo vertical negativo (para baixo), onde o perfil de temperatura vai se invertendo (LEMMA, 2004).

Os valores de profundidade de camada de mistura estão diretamente relacionados às classes PG, e podem ser apresentados conforme a tabela 2 (HOMMAN, 2013).

Tabela 2: Profundidade das camadas de mistura

CLASSE DE ESTABILIDADE	PROFUNDIDADE DA CAMADA DE MISTURA (m)
A	1600
B	1200
C	800
D	560
E	320
F	200

Fonte: (HOMMAN, 2013)

2.11 HotSpot

O *HotSpot Health Physics Codes* é um modelo de pluma gaussianana, utilizado para avaliar emergência ou planejamento na avaliação de segurança. O modelo semi-empírico gaussiano é usado para calcular a dispersão do material radioativo em relação ao deslocamento do vento no cenário impactado, influenciado principalmente pelas condições climáticas, determinando a concentração do material contaminante dispersado em algum ponto do espaço. Permite a modelagem da distribuição atmosférica inicial do material contaminante utilizado no cenário após uma explosão, incêndio ou ressuspensão, este último sendo considerado para este trabalho.

O código é projetado para lançamentos de curto prazo, fornecendo resposta a emergências com um conjunto rápido e portátil de ferramentas para avaliação dos cenários envolvendo material radioativo.

Sua configuração foi revisada para aproveitar o ambiente do sistema operacional Windows 95/98/00 NT (HOMANN, 2013). Neste estudo, a simulação foi feita utilizando a versão 3.1.0 do código HotSpot Health Physics Code.

2.11.1. Definições dos parâmetros de entrada do código HotSpot Health Physics utilizados para este cenário (HOMANN, 2013)

Termo Fonte (Source Term): O termo fonte é caracterizado pela quantidade do material contaminante liberado no meio ambiente. Este é o

principal coeficiente para a avaliação de risco, e pode ser considerado o ponto de partida para a determinação dos outros coeficientes necessários para a avaliação de contaminação ambiental (JOHN E. TILL & HELLEN A. GROGAN,2008).

Material liberado (*Material-at-Risk- MAR*): Atividade total (Bq) referente ao radionuclídeo envolvido no cenário de liberação.

Fração de liberação do material (*Damage Ratio - DR*): Fração de liberação do material de risco no cenário impactado.

Caminho de Vazamento (*Leakpath Factor - LPF*): O fator de filtração (LPF), é a fração do MAR, que passa através de um confinamento ou mecanismo de filtragem. Para cenários de liberação livre (não atenuada), o Fator Leakpath é 1.

Altura de Liberação Efetiva (*Effective Release Height - H_f*): A elevação da pluma resulta na altura de liberação efetiva.

Fração transportada pelo ar (*Airborne Fraction- AF/ARF*): É a fração da quantidade total do material de risco que é liberado na atmosfera.

Fração Respirável (*Respirable Fraction - RF*): É a fração da quantidade total de material envolvido no cenário que é respirável e acessível pela dispersão atmosférica.

Velocidade de Deposição (*Deposition Velocity*): A velocidade de deposição $\left[\frac{cm}{s}\right]$ é empiricamente definida como a razão do fluxo de deposição observado $\left[\frac{\mu Ci}{cm^2-s}\right]$ e a concentração de ar observada perto da superfície do solo $\left[\frac{\mu Ci}{cm^3}\right]$.

Velocidade de Deposição Respirável (*Respirable Deposition Velocity*) e Não Respirável (*Non-respirable Deposition Velocity*): Os componentes do termo-fonte respirável e não-respirável são estimados em função dos parâmetros material em risco (*Material-at-Risk- MAR*); relação de dano (*Damage Ratio - DR*); caminho de vazamento (*Leakpath Factor - LPF*); fração transportada pelo ar (*Airborne Fraction- AF/ARF*) e fração respirável (*Respirable Fraction - RF*).

A liberação da fração respirável é dispersada na atmosfera com o Diâmetro Aerodinâmico Mediano da Atividade (AMAD) de 1 micrômetro, e pode ser expressa conforme equação 8:

$$\text{Fração de Liberação Respirável} = AF \times RF \quad (8)$$

A liberação da fração não respirável é a fração do material de risco que é dispersada na atmosfera com o diâmetro aerodinâmico que excede 10 micrômetros, e pode ser expressa conforme equação 9 ou 10:

$$\text{Liberação da Fração Não – Respirável} = AF \times (1 - RF) \quad (9)$$

ou

$$MAR \times DR \times LPF \times AF \times (1 - RF) \quad (10)$$

Entende-se como termo fonte respirável, o total de material do evento de liberação da fração respirável, conforme equação

11:

$$MAR \times DR \times LPF \times AF \times RF \quad (11)$$

Velocidade do Vento a 10 metros de altura (10-meter wind speed) / Altura de entrada do vento (wind input height): A equação da pluma gaussiana requer a velocidade do vento na altura H, a altura de liberação efetiva. Os dados de velocidade do vento são referenciados a uma altura de 10 metros. Os dados reais podem ser medidos a uma altura diferente, entretanto, serão ajustados para uma altura de referência de 10 metros. O software HotSpot utiliza a fórmula de lei de potência, conforme equação 12 (HOMANN, 2013), para ajustar a velocidade do vento para todas as alturas efetivas maiores que 2 metros. Para altura de liberação menor que 2 metros, a velocidade do vento será ajustada a uma altura de 2 metros.

$$u(H) = u(z) \left(\frac{H}{z} \right)^p \quad (12)$$

onde:

$u(z)$ = Velocidade do vento $\left[\frac{m}{s}\right]$, na altura de referência z [m]

H = Altura de liberação efetiva [m]

p = fator obtido pela tabela 3

Tabela 3: Fator exponencial usado pelo HotSpot para calcular a variação da velocidade do vento com a altura

Classes de Estabilidade Atmosférica					
A	B	C	D	E	F
0,07	0,07	0,10	0,15	0,35	0,55

Fonte: (HOMMAN, 2013)

Direção do Vento: Determina a direção proveniente do vento assim como as coordenadas, conforme tabela 4.

Tabela 4: Direção e coordenadas do vento

Coordenadas	Sentido
0°	Norte
90°	Leste
180°	Sul
270°	Oeste

Fonte: (HOMMAN, 2013)

Classes de Estabilidade: As condições meteorológicas têm um papel determinante no transporte de material radioativo. Pasquill, baseando-se em análises meteorológicas como velocidade do vento, intensidade de radiação solar, altura das nuvens, propôs o conceito de classes de estabilidade atmosférica, que se tornaram muito úteis nos cálculos de dispersão atmosférica,

abordando o modelo de pluma Gaussiana. Baseado nas classes de estabilidade de Pasquill, Gifford desenvolveu as curvas de Pasquill-Gifford, que associam σ_y e σ_z , que são os coeficientes de dispersão horizontal e vertical respectivamente, com a distância do material contaminante (x) e com a classe de estabilidade atmosférica (HOMMAN, 2013).

O σ_θ foi usado como referência para estudar critérios para tipificar a turbulência, evidenciando a necessidade de padronização da forma de obtenção do tipo de turbulência que varia com a altura e com o período de tempo sobre o qual σ_θ é calculado. Os valores apresentados na tabela 5 correspondem a procedimentos padrões de medida, adotando a velocidade do vento obtida em torres de 10m (A.KERR, 2001 APUD SEDEFIAN E BENNETT, 1980).

Tabela 5: Condições de Estabilidade Atmosférica e Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno padrão

Condições de Estabilidade Atmosférica				
Pasquill	Descrição	σ_θ (graus)	σ_y (m)	σ_z (m)
A	Extremamente Instável	25 ⁰	$\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	0,20x
B	Instável	20 ⁰	$\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	0,12x
C	Ligeiramente Instável	15 ⁰	$\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,080x}{\sqrt{1 - 0,0002x}}$
D	Neutra	10 ⁰	$\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,060x}{\sqrt{1 - 0,0015x}}$
E	Ligeiramente Estável	5 ⁰	$\frac{0,06x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,030x}{\sqrt{1 - 0,0003x}}$
F	Estável	2,5 ⁰	$\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,016x}{\sqrt{1 - 0,0003x}}$

Fonte: (HOMMAN, 2013)

Coeficiente de rugosidade do solo (*input surface roughness*) - Terreno padrão (*standard/rural – conservative option*): O código HotSpot por meio de equações, estima os valores de desvio-padrão da distribuição do

material contaminante para dois tipos de terrenos: (1) urbano e (2) padrão. Para este trabalho foi considerado o terreno padrão.

(1) Em áreas urbanas, a dispersão da pluma em estruturas com características de retenção, como asfalto e concreto, em relação ao terreno padrão é maior, resultando em concentrações menores de radionuclídeos para cada coeficiente de rugosidade, quando comparado com o terreno padrão (HOMANN, 2013).

(2) Os coeficientes de rugosidade do terreno caracterizam as superfícies de diferentes formas, conforme as irregularidades ou presença de edifícios (HOMANN, 2013). Estas irregularidades (cm) representam diferentes granulometrias. Conforme mencionados na tabela 6, foram usados para calcular e comparar a deposição do radioisótopo Césio-137 no solo, considerando em ordem crescente as irregularidades do terreno.

Tabela 6: Coeficiente de rugosidade do solo para diferentes superfícies

Coeficiente de rugosidade (cm)	Tipo de superfície do terreno
3	Área agrícola aberta sem cerca e muitos edifícios dispersos, apenas colinas suavemente arredondadas
10	Terras agrícolas com algumas casas e 8 metros de altura abrigando sebes (cercas) com uma distância de aproximadamente 500m.
20	Terras agrícolas com algumas casas e 8 metros de altura abrigando (cercas) com uma distância de aproximadamente 250m.
40	Pequenas cidades com muitas ou altas sebes, florestas ou terrenos muito irregulares.
80	Grandes cidades com altos edifícios.
160	Cidades muito grandes com altos edifícios e arranha-céus.

Fonte: AHMED E BHARAT, 2012

Neste trabalho foi considerado o pior caso, buscando um estudo conservativo, onde são estimadas as condições mais graves, adotando-se o terreno padrão.

Tempo de amostragem da fonte (*sample time*): As equações para o desvio padrão da distribuição da concentração Gaussiana na direção do eixo (σy) representam as características da pluma ao longo de um período de tempo. No código HotSpot, esse tempo médio é chamado de tempo de amostragem. Concentrações a favor do vento de uma fonte diminuem com o aumento do tempo de amostragem. A equação 13 (HOMANN, 2013) se ajusta para tempos de amostragem diferentes de 10 minutos (HANNA, ET AL., 1982; GIFFORD, 1975).

$$\sigma'y = \sigma y \left[\frac{t}{10} \right]^{0,2} \quad (13)$$

onde:

σy = Desvio padrão de 10 minutos da distribuição da concentração

$\sigma'y$ = Desvio padrão para o tempo médio t

Geometria da fonte (*source geometry*): A dose externa de uma fonte depende de sua geometria. Foi considerado para este estudo uma fonte simples pontual.

Camada de Mistura (*Mixing Layer*): No Hotspot, o default usado no software HotSpot da camada de mistura é de 5.000 m. A altura da camada de mistura é tipicamente de 300 a 3.000 m, mas pode aumentar significativamente os valores de concentração de ar. Este parâmetro não influencia na depleção do material contaminante, porém a rugosidade da superfície do terreno dentre outros fatores externos influencia na profundidade da camada de mistura atmosférica.

Deposição Seca: Partículas muito pequenas são depositadas na superfície como resultado da difusão turbulenta. Reações químicas, e outros processos químicos, físicos e biológicos mantêm a liberação da substância ao nível do solo. Conforme este material é depositado na superfície, a pluma é

depletada. Esse processo é denominado deposição seca e a velocidade de deposição efetiva em $\left[\frac{cm}{s}\right]$ é definida empiricamente como a razão entre fluxo de deposição observado $\left[\frac{\mu Ci}{cm.s-2}\right]$ e a concentração de ar observada próximo a superfície do solo $\left[\frac{\mu Ci}{cm^3}\right]$.

Para muitos materiais, a velocidade de deposição seca pode ser assumida a cerca de $1 \left[\frac{cm}{s}\right]$ e a deposição seca na superfície $\left[\frac{Ci}{cm^2}\right]$, pode ser assumida sendo igual a velocidade de deposição seca vezes a concentração. (Hanna & Britter, 2002).

A velocidade de deposição seca pode variar em função da composição química do termo fonte, do coeficiente da superfície do solo e condições meteorológicas. (S. PAL ARYA, 1999).

Neste parâmetro insere-se a velocidade de deposição de liberação respirável. O código assume a velocidade de deposição igual a zero quando o cenário envolve gases nobres. Tal suposição resultaria em estimativas de concentração irrealistas e grandes distâncias a favor do vento. A velocidade de deposição é usada para (1) partículas respiráveis e (2) não respiráveis.

- (1) Menores que 10 micrômetros de diâmetro aerodinâmico
- (2) Maiores que 10 micrômetros de diâmetro aerodinâmico

Representa-se a depleção da pluma, ou velocidade de deposição conforme equação 14.

$$DF(X) = \left[\exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x) \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} dx \right]^{-\frac{u \sqrt{2}}{v \sqrt{\pi}}} \quad (14)$$

onde:

$$DF(X) = \text{Fator de depleção} \left[\frac{m}{s}\right]$$

X= Distância a favor do vento [m]

v = Velocidade de deposição $\left[\frac{cm}{s}\right]$

u = Média da velocidade do vento no nível do solo $\left[\frac{m}{s}\right]$

H = Altura efetiva de liberação [m]

σ_z = Desvio padrão da distribuição da concentração do ar na direção vertical (eixo z) para qualquer ponto no terreno aplicado [m].

Instante de liberação do material contaminante (*Holdup time*): O material é imediatamente liberado na atmosfera. O default, zero, é assim considerado devido a liberação instantânea.

Radiação produzida na superfície do solo (*Ground Shine*): É a radiação produzida pelo material radioativo na superfície do solo do terreno. Varia conforme o tipo e quantidade de radiação produzida, e pode ou não ter significativo consequência para a saúde, conforme FGR 13.

Taxa de respiração (*breathing rate*): Este parâmetro representa a taxa na qual um indivíduo inala o ar em um determinado ponto de referência no cenário em $\left[\frac{m^3}{s-1}\right]$.

Ressuspensão: O fator de ressuspensão é a razão entre a concentração do material contaminante no ar $\left[\frac{Ci}{m^3}\right]$ em função da concentração no solo $\left[\frac{Ci}{m^2}\right]$. É representado pela dimensão $\left[\frac{1}{m}\right]$.

O fator de ressuspensão é reajustado se a velocidade do vento ultrapassar $3 \left[\frac{m}{s}\right]$, conforme a equação 15 (HOMANN, 2013):

$$RF(u) = RF \cdot \left(\frac{u}{3}\right)^2 \quad (15)$$

onde:

RF = Fator de ajuste

u = Velocidade do vento $\left[\frac{m}{s}\right]$

3. METODOLOGIA

As principais variáveis consideradas neste estudo são:

- a) Classes de Estabilidade Atmosférica de Pasquill-Gifford;
- b) Coeficientes de rugosidade do Solo, e
- c) Distâncias de Liberação do material radioativo em relação aos indivíduos receptores

Na seguinte ordem, foi realizada a modelagem no código HotSpot, possibilitando a estimativa das doses efetivas totais (TED), taxas de dose provenientes da superfície do solo e o risco de desenvolvimento da síndrome aguda da radiação:

- I. simulação do evento RDD com HotSpot;
- II. avaliação de doses efetivas totais (TED) no local;
- III. avaliação do comportamento das classes PG (A-F) em cada limite de interesse (interno, médio, externo);
- IV. estimativa das taxas de dose de radiação provenientes da superfície do solo;
- V. avaliação de risco;

3.1. Cenário de Exposição

O estudo compreende a simulação de um cenário no qual há dispersão de material radioativo Césio-137 para o meio ambiente por meio da liberação de um Dispositivo de Dispersão Radiológica (RDD). A simulação do cenário foi realizada utilizando-se o código *HotSpot Health Physics* (HOMANN, 2013), e manipulações algébricas no Microsoft Excel, de forma a permitir estimativa das taxas de dose de radiação por deposição no solo (considerando a exposição externa por contaminação da superfície do solo – ground shine, FGR 13,1999), e o risco (relação entre ameaça e vulnerabilidade), às quais indivíduos do público foram expostos. Para modelar a dispersão do material radiológico na atmosfera e sua deposição no solo, o HotSpot utiliza o modelo de dispersão gaussiano, que permite uma avaliação conservativa do cenário. Para este trabalho, foi avaliada

a contaminação radiológica de uma área genérica em um terreno padrão, sendo este o pior caso. Foram consideradas as classes PG (A-F) e seis coeficientes de rugosidade do terreno (3 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80cm E 160 cm) para fins de comparação da concentração do material contaminante a diferentes pontos de referência.

3.2. Parâmetros de entrada utilizados na simulação

Os parâmetros de entrada utilizados na modelagem são listados na tabela 7. Estes parâmetros foram definidos conforme descrito no capítulo 2 (Definições dos parâmetros de entrada do código *HotSpot Health Physics* utilizados para este cenário).

Tabela 7: Parâmetros de entrada

Modelo <i>General Plume</i>	
Termo Fonte	
Radioisótopo	Césio-137
Material liberado (MAR)	4,4400+14 Bq
Fração de liberação (DR)	1
Caminho de vazamento	1
Altura de liberação efetiva	0 m
Velocidade de deposição	0,30 cm.s ⁻¹
Fração transportada pelo ar (ARF)	1,00E+00
Fração respirável (RF)	1,00E+00
Características de estabilidade atmosférica	
Velocidade do vento a 10m de altura	1 m/s
Direção do vento	270°
Classes de estabilidade atmosférica	A-F
Referencial dos indivíduos expostos	
Altura	1,5 m
Posição dos indivíduos	0,03; 0,5; 1,0; 20; 80 Km
Coefficientes de rugosidade do solo	3, 10, 20,cm, 80 e 160 cm
Tempo de amostragem da fonte	10 min
Altura de entrada do vento (chaminé)	10 m
Velocidade de deposição não-respirável	8 cm.s ⁻¹
Instante de liberação	0 min
DCF Library	FGR 13
Taxa de respiração	4,17E-04 m ³ .s ⁻¹
Limites da pluma de contaminação (interno, médio, externo)	0,100; 0,020; 1,00E-03 Sv
Duração da exposição	4 dias

Fonte: HOMANN, 2013

O código HotSpot disponibiliza 6 janelas com diferentes parâmetros de entrada, que foram selecionados e alterados conforme a necessidade do eventual cenário em estudo. Será observado ao longo do texto que nem todos os parâmetros foram inseridos, e em alguns casos o default foi mantido.

Para este cenário (*RDD*), o modelo *General Plume* foi selecionado, conforme representado na figura 12.

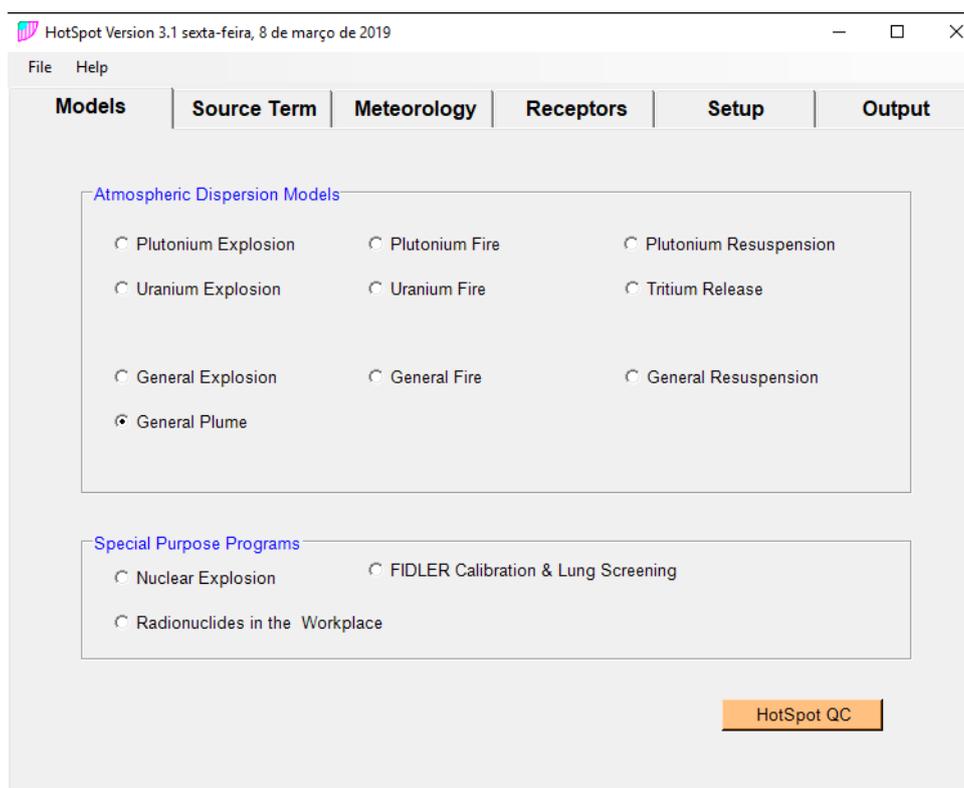


Figura 12: Modelo adotado para a liberação de um RDD

Fonte: HOMANN, 2013

Este modelo permite avaliar a dispersão do material radiológico na atmosfera e sua deposição no solo.

A janela 2 representa a estimativa da quantidade do material contaminante, Césio-137, liberado no meio ambiente.

HotSpot Version 3.1 quarta-feira, 10 de abril de 2019

File Help

Models Source Term Meteorology Receptors Setup Output

Model : General Plume

Radionuclide: Cs-137 D 30.0y

Material-at-Risk (MAR): 4,4400E+14 Bq

Damage Ratio (DR): 1,000

Effective Release Height: 0 m

Deposition Velocity: 0,30 cm/sec

Leakpath Factor: 1,000

Calculate Plume Rise

Airborne Fraction (ARF): 1,00E+00

Respirable Fraction (RF): 1,00E+00

Figura 13: Termo-fonte

Fonte: HOMANN, 2013

A atividade $4.4E+14$ Bq considerada para o termo fonte, foi assumida como uma constante, baseando-se no tempo de observação de quatro dias, que é muito menor que o tempo de meia vida de 30 anos do radionuclídeo, tornando sem relevância a correção da atividade.

O Césio-137 foi escolhido como o radionuclídeo contaminante para a modelagem devido seu comportamento físico-químico diferente nos solos, e à sua alta mobilidade ambiental e forma física, pois pode ser usado como um pó. Além disso, sua grande hidrossolubilidade facilita essa mobilidade pelos fluidos corpóreos uma vez dentro do corpo humano (NISHIYAMA ET AL. 1985; TAYLOR ET AL. 2008). O termo de origem, Césio-137, foi selecionado com base na categorização de fontes radioativas sugeridas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2005).

A velocidade de deposição é aproximadamente $1 \left[\frac{cm}{s} \right]$ para a maioria dos materiais (HANNA, 2002). O código adota duas metodologias de velocidade de deposição. Para velocidade de partículas respiráveis (diâmetro aerodinâmicos menores que 10 micrômetros), sem a presença de gases nobres, $0,3 \left[\frac{cm}{s} \right]$ e para

partículas não respiráveis (diâmetro maior que 10 micrômetros), 8,0 cm/s (HOMANN, 2013), possibilitando a estimativa das doses efetivas totais (TED).

A altura de liberação efetiva (*Effective Release Height*) H (representada na figura 10) da pluma, pode reduzir a concentração do material contaminante no nível do solo. Os dados de deposição do solo em função da concentração de radionuclídeos são estimados no nível do solo (0 metros), onde a concentração varia em função da turbulência mecânica.

Adotou-se para o Caminho de Vazamento (*Leakpath Factor - LPF*) o default 1, pois no cenário, a liberação do contaminante não é atenuada, por este motivo, a fração de liberação do material (*Damage Ratio - DR*) foi considerada 100%, mantendo o default 1, tornando o cenário ainda mais conservativo.

Foram consideradas as Classes PG (A-F), conforme figura 14.

HotSpot Version 3.1 quarta-feira, 10 de abril de 2019

File Help

Models Source Term **Meteorology** Receptors Setup Output

10-meter Wind Speed: 1,00 m/s

Display Wind Chart

Selected Stability Class: A

Wind Direction: 270 Wind from the West

Atmospheric Stability

Enter Solar Information - or - Enter the Actual Stability

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

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

Figura 14: Classes de Estabilidade Atmosférica

Fonte: HOMANN, 2013

Para prever a dispersão, transporte e depleção dos poluentes, as informações meteorológicas são necessárias.

A velocidade do vento influencia na taxa de dispersão da pluma. Sua direção estima as áreas que serão contaminadas e a estabilidade atmosférica interfere no grau de diluição dos poluentes no terreno padrão (HOMANN, 2013).

Na janela 4, foram selecionadas as coordenadas dentro de um espaço amostral de 0,03 Km a 80 km, que representam indivíduos presentes no momento do acidente em um determinado referencial. Dentro dessas coordenadas, alguns pontos específicos (0,5 km; 1,0 km; 6,0 km; 10,0 km) foram adotados para estimar resultados mais precisos, considerando que o limite ótimo do HotSpot indicado pelo desenvolvedor é de 10 Km. Adotou-se 1,5m a altura média dos indivíduos expostos.

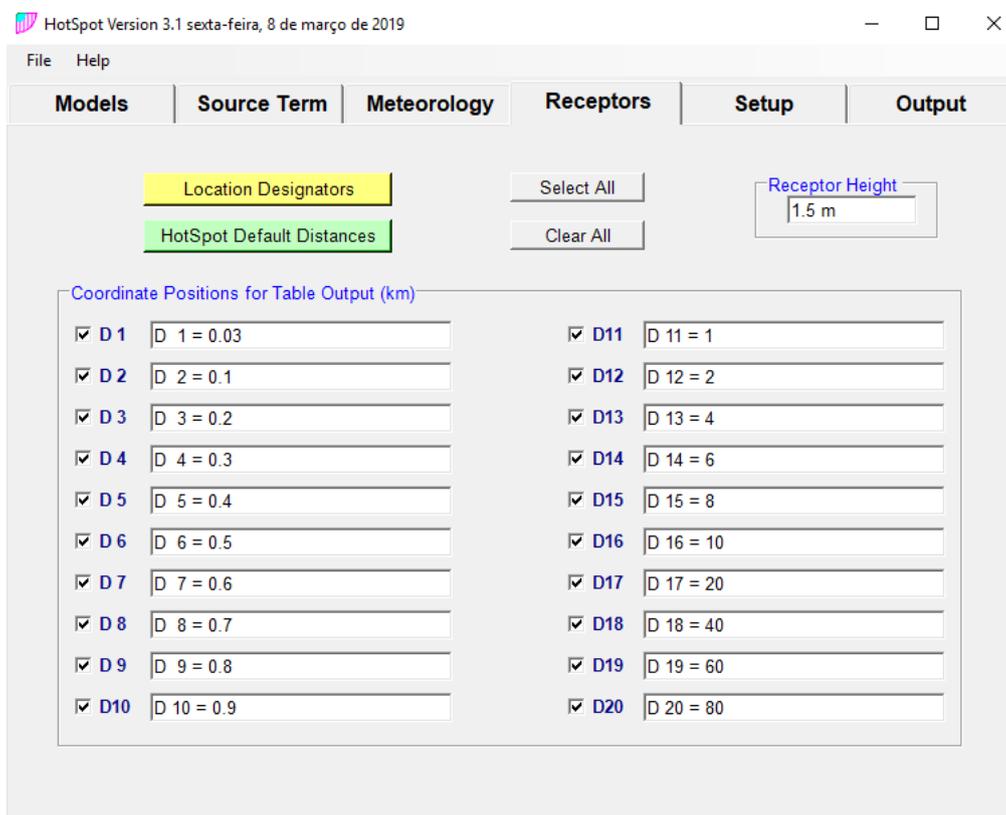


Figura 15: Posição dos receptores em relação à fonte

Fonte: HOMANN, 2013

Foi considerada a via de exposição para a deposição de radionuclídeos em diferentes coeficientes de rugosidade no solo, conforme figura 17.

Buscou-se um estudo conservativo, onde foram avaliadas as condições mais graves, utilizando na modelagem a aproximação para o terreno padrão (JOHN E. TILL & HELLEN A. GROGAN, 2008).

Os coeficientes de rugosidade foram inseridos no parâmetro rugosidade de superfície (*input surface roughness*). Para cada coeficiente, foi simulado o comportamento da deposição do radionuclídeo no solo, comparando a estimativa de risco em todas as classes de estabilidade atmosférica (A-F) para diferentes distâncias. O cálculo dos coeficientes de dispersão horizontal e vertical para o cenário padrão é representado na tabela 5, sendo este mais conservativo.

O tempo médio de amostragem da fonte (*sample time*) para o eventual cenário foi de 10 minutos, considerando que a concentração do contaminante diminui proporcionalmente ao tempo (HOMANN, 2013). Esta concentração está associada a radiação produzida na superfície (*Ground Shine*) e varia conforme o tipo e a quantidade da radiação produzida.

As condições de contorno (*Inner, Middle e Outer*) correspondem respectivamente aos valores 0,100 Sv, 0,020 Sv e 1,00E-03 Sv. Este parâmetro representa os limites de distância das doses máximas para cada Classe PG, possibilitando resultados correspondentes à influência das classes PG ao longo desses limites (HOMANN, 2013).

Os dados de velocidade do vento foram referenciados a uma altura de 10 metros, baseados na fórmula de lei de potência (HOMANN, 2013), equação 13, capítulo 2. Para evidenciar os fatores de risco de câncer oriundos à exposição externa ao material radioativo, foram avaliadas as vias de exposição externa por contaminação da superfície e submersão do ar, considerando a FGR 13 para esta estimativa.

A liberação do Césio-137 foi considerada instantânea. Por este motivo, o parâmetro Tempo de espera (*Holdup time*) permaneceu no modo *default* do software, que adota o valor zero para liberações instantâneas (HOMANN, 2013).

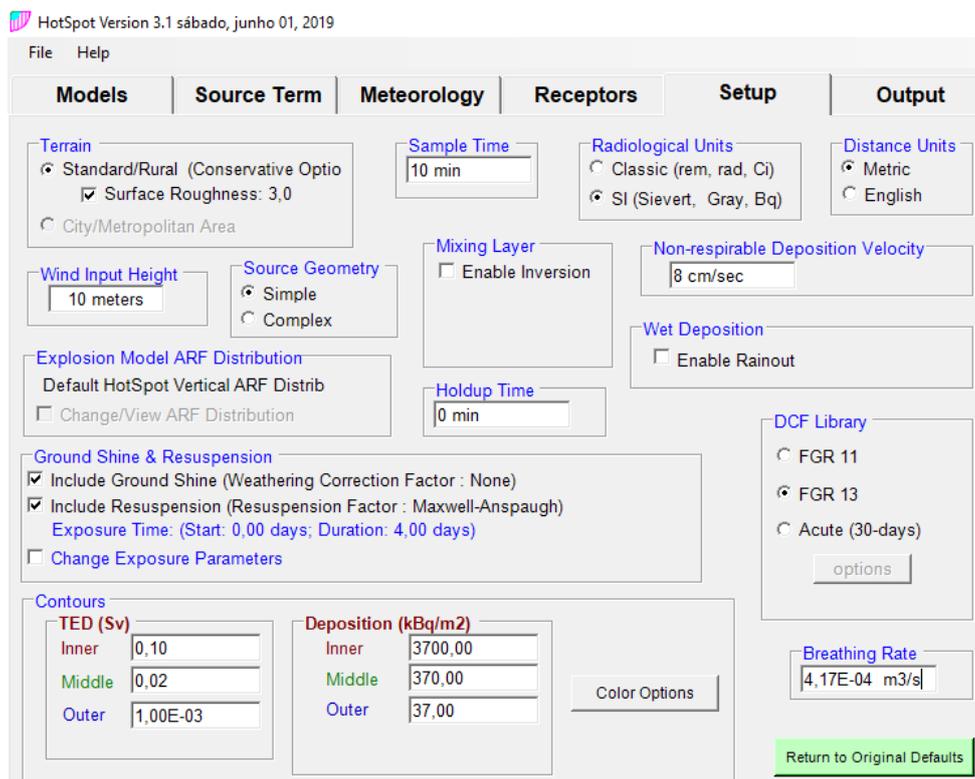


Figura 16: Caracterização do terreno padrão

Fonte: HOMANN, 2013

Os dados de saída são gerados pela janela output, conforme figura 18. Ao final de todos os parâmetros inseridos em cada janela, o código gera um documento em formato txt com os resultados de saída da modelagem. Como pode ser observado abaixo, ao selecionar o parâmetro (*Display All TED componentes*), todos os componentes (TED) são gerados no relatório. Para finalizar a simulação, o parâmetro Tabela de Saída (*Table Output*), foi selecionado.

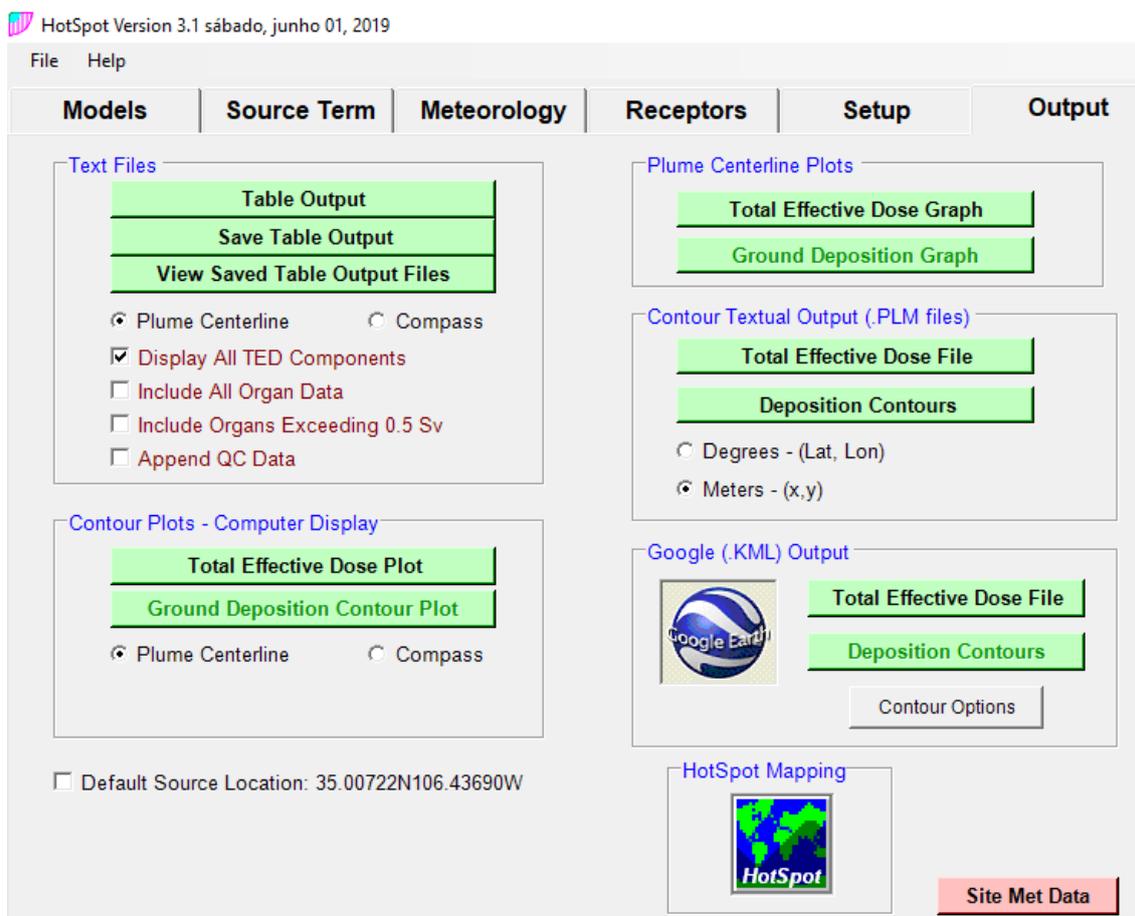


Figura 17: Resultados de saída/Output

Fonte: (HOMANN, 2013)

3.3. Estimativa das doses efetivas totais (TED) e taxas de dose de radiação

A partir dos dados gerados pelo relatório de saída no formato txt, tornou-se possível avaliar as doses efetivas totais (TED) e as taxas de dose de radiação (Ground Shine Dose Rate) produzida pelo material radioativo na superfície do solo.

As taxas de dose de radiação e as TEDs foram avaliadas em função de cada coeficiente de rugosidade do solo para cada Classe PG), a diferentes distâncias.

As taxas de dose foram equacionadas no Microsoft Excel e por meio de manipulações algébricas, ou seja, integrando a taxa de dose no tempo (h), foram convertidas em dose para 24h, 48h e 96h. A atividade do Césio-137 foi assumida como constante com base no fato de que o tempo de observação (4 dias) é muito

mais curto que sua meia-vida ($T_{1/2}$ 30 anos). Esta constatação permite a liberdade de prescindir correções para a atividade neste curto período de tempo.

3.4. Estimativa de risco

Após a estimativa das doses, o risco em função do tempo [h] foi calculado por manipulações algébricas, conforme representado na equação 16. Foi considerado que quanto maior o tempo para atingir 0,7 Sv, menor o risco de desenvolvimento da Síndrome Aguda da Radiação. A vulnerabilidade é representada pela dose de 0,7 Sv, considerada como um limiar determinístico CNEN, 2015, e a taxa de dose $\dot{D} \left[\frac{Sv}{h} \right]$ é a ameaça proveniente da superfície do solo integrada no tempo [h].

$$T_{0,7} = \frac{0,7}{\dot{D}} \quad (16)$$

onde:

0,7 representa a vulnerabilidade [Sv]

\dot{D} representa a taxa de dose de radiação, representando a ameaça $\left[\frac{Sv}{h} \right]$

Em função dos diversos fatores evidenciados ao longo desse estudo (Classes PG e coeficientes de rugosidade do solo a diferentes distâncias), foi considerada a via de exposição externa por contaminação da superfície do solo, uma das vias de exposição da *Federal Guidance Report N 13*. Dessa forma foi possível avaliar o risco em função da relação de ameaça (taxa de dose) e vulnerabilidade, que é o tempo estimado para atingir 0,7 Sv no indivíduo exposto ao cenário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Eventos radiológicos que incluem a liberação de materiais radioativos para o meio ambiente podem ser descritos por um conjunto complexo de parâmetros dependentes ou não do tempo, como os apresentados neste trabalho. Esse conjunto de dados pode ser usado como base para a tomada de decisões em uma situação de emergência. Nessa linha, os tomadores de decisão precisam de apoio científico para lidar com esse cenário complexo em suas tentativas de otimizar o uso dos recursos disponíveis e atingir os objetivos da resposta que devem passar pela mitigação dos danos tanto sob o aspecto material quanto humano.

Desta forma, dois parâmetros considerados principais neste trabalho, as Doses Efetivas Totais (TED) e a Taxa de Dose de radiação proveniente do solo, tem seus valores calculados de forma conservativa, podendo contribuir para se estimar o impacto máximo que o evento pode ter sobre uma população potencialmente afetada, segundo aspectos considerados de valor para o cenário. Assim, a TED e a Taxa de Dose apontam para a direção de risco crescente. Sugere-se que as Classes PG exercem uma influência crescente sobre a TED e a Taxa de Dose e conseqüentemente sobre o risco radiológico global.

4.1. Estimativa do valor máximo da Dose Efetiva Total (TED) em função dos seis coeficientes de rugosidade do solo e das Classes PG (A-F) durante 4 dias

A estimativa da Dose Total Efetiva (TED) obtida como resultado dos cálculos do HotSpot, indicam a dose esperada no contorno das plumas, representando a influência das Classes de Estabilidade e dos coeficientes de rugosidade do solo na distância em que a TED excede os limites de segurança (HOMANN, 2013). A tabela 8 representa todos os valores estimados para a TED máxima.

Tabela 8: Dose Efetiva Total Máxima (TED máx.)

Coeficientes de Rugosidade do Solo (cm)	Dose Efetiva Total máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
3	1,19E+02	1,84E+02	2,25E+02	2,74E+02	7,93E+02	3,01E+03
10	1,02E+02	1,82E+02	2,66E+02	3,22E+02	6,25E+02	2,38E+03
20	0,92E+02	1,74E+02	2,79E+02	3,60E+02	5,52E+02	2,07E+03
40	0,83E+02	1,63E+02	2,82E+02	3,94E+02	5,07E+02	1,81E+03
80	0,73E+02	1,50E+02	2,77E+02	4,15E+02	5,00E+02	1,58E+03
160	0,65E+02	1,36E+02	2,64E+02	4,22E+02	5,38E+02	1,38E+03

Fonte: A autora

Decorrente da tabela 8, a figura 18 estima o valor máximo da Dose Efetiva Total (TED) em função dos seis coeficientes de rugosidade do solo (3cm, 10cm, 20cm, 40cm, 80cm e 160cm) e das Classes PG (A-F);

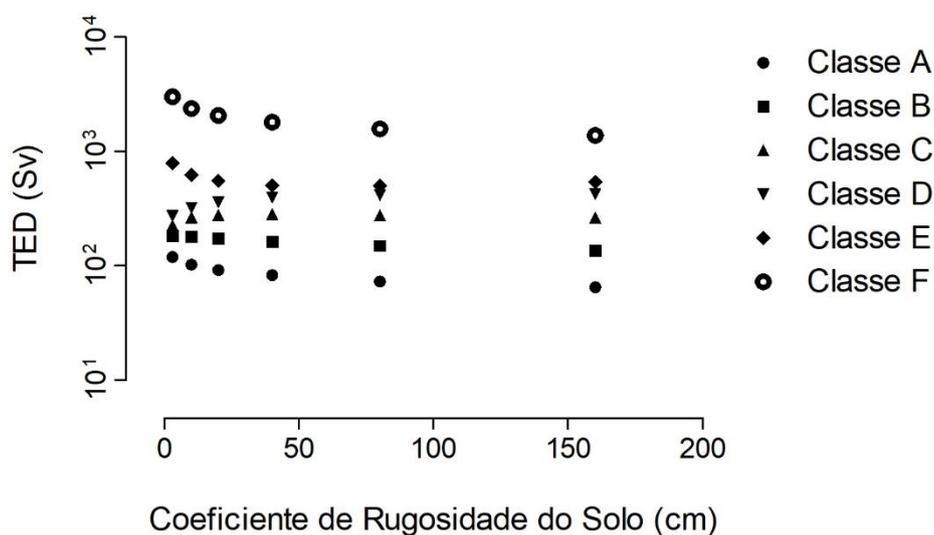


Figura 18: Valor máximo da Dose Efetiva Total (TED) em função dos coeficientes de rugosidade do solo e das Classes PG (A-F).

Fonte: A autora

A figura 18 sugere que as Classes PG exercem uma influência crescente sobre a TED. No entanto, nota-se que este comportamento se destaca para as Classes E e F, que mostram um crescente impacto sobre a TED. Pode ser observado que os valores calculados para a TED máxima, são maiores em classes mais estáveis. Foi observado também que quanto menor o coeficiente de rugosidade do solo, maior a TED.

A figura mostra que na Classe PG D, considerada neutra, a TED é menor para o coeficiente de rugosidade de 3cm. É considerada exceção, pois na grande maioria dos casos, a concentração do radioisótopo é menor em coeficientes de rugosidade menores, resultando em doses mais altas, visto que a blindagem da radiação neste caso pode ser considerada menor (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 apud UNSCEAR, 2000), Isso pode acontecer em consequência da turbulência mecânica causada pelo atrito entre o vento e o solo. Deve ser considerado também o comportamento do Césio-137 no solo. Sua migração vertical varia em diferentes tipos de solo é considerada muito lenta, mas ainda assim, a fração maior do radionuclídeo, mesmo após a deposição, se concentra nas camadas superiores menores (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 apud UNSCEAR, 2000).

4.2. Avaliação da influência das Classes PG (A-F) em cada limite de interesse da pluma (interno, médio, externo) durante 4 dias

A tabela 9 representa as distâncias em que a TED excede os limites definidos (0,100Sv, 0,020Sv e 1,00E-03Sv), que são doses reconhecidas em situações de emergência, evacuação e doses para indivíduos ocupacionalmente expostos (CNEN, 2014 NN 3.01).

Tabela 9: Limites excedidos pela TED (*inner, middle, outer*)

Coeficiente de rugosidade do solo (cm)	Limite (Sv)	Distância em que a TED excede os limites definidos (km)					
		A	B	C	D	E	F
3	I	0,38	0,57	0,87	1,50	2,10	2,10
	M	0,85	1,30	2,10	4,00	5,60	4,50
	E	4,00	6,20	13,00	30,00	32,00	15,00
10	I	0,34	0,51	0,78	1,30	2,10	2,40
	M	0,77	1,10	1,80	3,70	5,60	5,40
	E	3,60	5,50	12,00	29,00	36,00	20,00
20	I	0,32	0,47	0,74	1,30	2,00	2,50
	M	0,71	1,10	1,70	3,40	5,50	5,90
	E	3,30	5,10	11,00	28,00	38,00	23,00
40	I	0,30	0,45	0,69	1,20	1,90	2,60
	M	0,67	1,00	1,60	3,20	5,30	6,40
	E	3,10	4,80	9,90	26,00	41,00	28,00
80	I	0,28	0,42	0,64	1,10	1,80	2,70
	M	0,62	0,94	1,50	3,00	5,10	6,80
	E	2,90	4,50	9,10	25,00	43,00	31,00
160	I	0,26	0,39	0,60	1,00	1,70	2,70
	M	0,58	0,88	1,40	2,80	4,90	7,00
	E	2,70	4,20	8,40	23,00	44,00	34,00

Fonte: A autora

As linhas representadas na figura 26 correspondem aos limites de dose para cada Classe PG. Também são mostrados os resultados correspondentes à influência das classes PG ao longo desses limites. Cada figura no layout representa um coeficiente de rugosidade do solo.

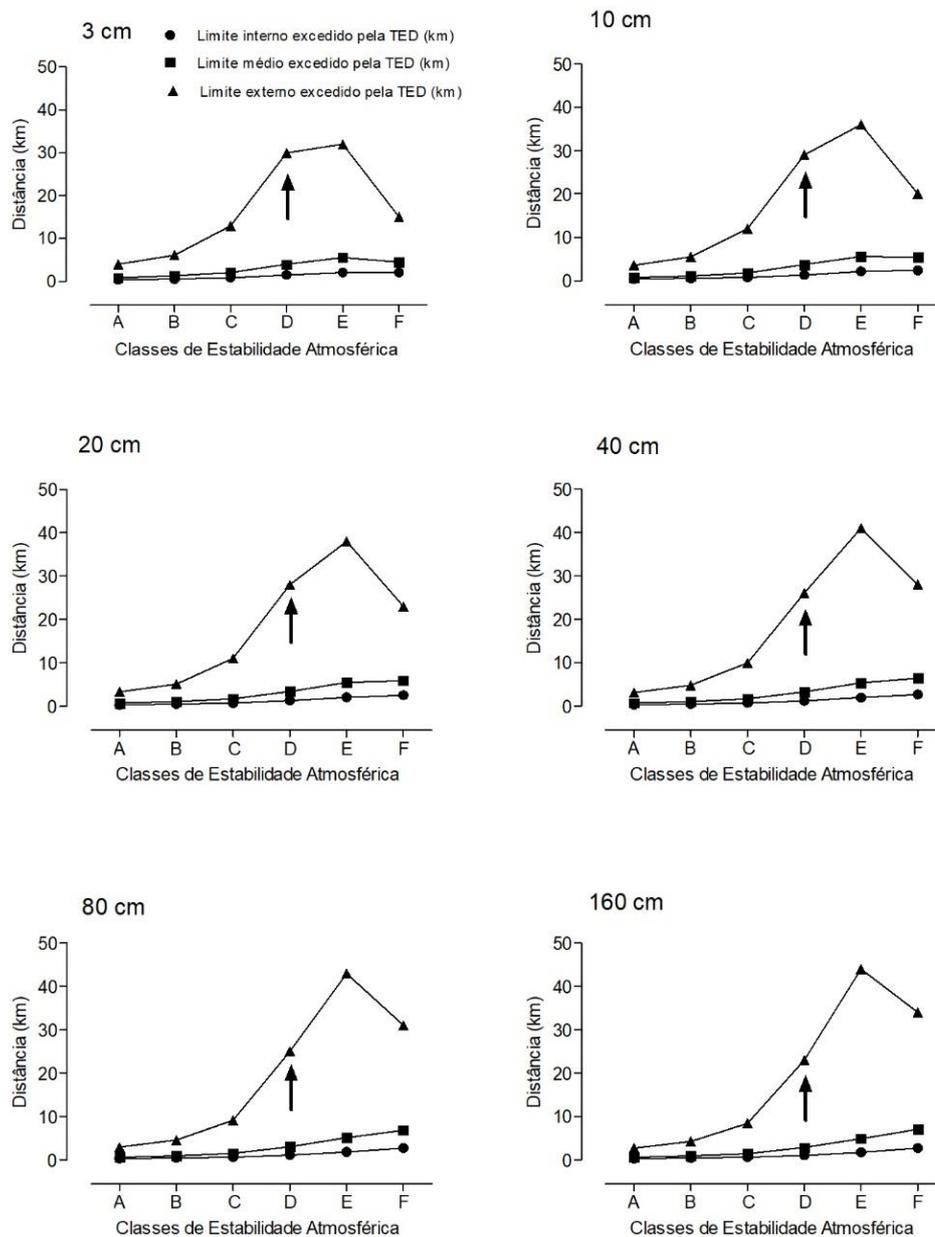


Figura 19: Distâncias em que a TED excede os limites definidos (*inner* 100mSv, *middle* 20mSv e *outer* 1mSv) considerando cada Classe PG (A-F), para cada coeficiente de rugosidade do solo (3; 10; 20; 40; 80; 160 cm)

Fonte: A autora

A tomada de decisão deve ser responsável tanto pela proteção do meio ambiente quanto dos indivíduos envolvidos. Embora o impacto de tais variáveis ambientais na TED seja de interesse, já que as circunstâncias meteorológicas influenciam diretamente na dispersão do contaminante, os resultados mostrados sugerem que o impacto das Classes PG na extensão dos limites de

contaminação é muito pequeno. O realce no gráfico tem o objetivo de evidenciar esta tendência, e destacar também o ponto em que a influência dos fatores externos se intensifica.

Pode ser observado que entre as classes D e F, a dispersão do radionuclídeo em um terreno padrão é maior. Frente a estas condições meteorológicas que são classificadas como neutra à muito estável, o impacto gerado sobre indivíduos do público pode ser aumentado, quando comparado às estimativas para outras classes. Este resultado se revela importante para procedimentos de evacuação, que exigirá maior esforço das autoridades e respondedores por conta da premência do tempo.

4.3. Cálculo da taxa de dose de radiação da superfície do terreno em função das distâncias e dos coeficientes de rugosidade do solo para cada Classe PG (A-F) durante 4 dias

As tabelas 10 à 15, representam o resultado do cálculo para a estimativa da taxa de dose de radiação do solo em função das distâncias e dos coeficientes de rugosidade do solo para cada Classe (A-F).

Tabela 10: Estimativa das taxas de dose na Classe de estabilidade atmosférica A

Distância (Km)	Coeficiente de rugosidade do solo (cm) / Taxa de Dose (Sv/h)					
	CLASSE PG A					
	3	10	20	40	80	160
0,5	8,40E-05	6,70E-05	5,80E-05	5,10E-05	4,50E-05	3,90E-05
1,0	2,10E-05	1,70E-05	1,50E-05	1,30E-05	1,10E-05	9,90E-06
6,0	7,00E-07	5,60E-07	4,90E-07	4,30E-07	3,80E-07	3,30E-07
10,0	2,80E-07	2,20E-07	2,00E-07	1,70E-07	1,50E-07	1,30E-07

Fonte: A autora

Tabela 11: Estimativa das taxas de dose na Classe de estabilidade atmosférica B

Distância (Km)	Coeficiente de rugosidade do solo (cm) / Taxa de Dose (Sv/h)					
	CLASSE PG B					
	3	10	20	40	80	160
0,5	1,90E-04	1,50E-04	1,30E-04	1,10E-04	1,00E-04	8,80E-05
1,0	4,70E-05	3,80E-05	3,30E-05	2,90E-05	2,50E-05	2,20E-05
6,0	1,50E-06	1,20E-06	1,10E-06	9,50E-07	8,40E-07	7,40E-07
10,0	6,00E-07	4,90E-07	4,30E-07	3,80E-07	3,40E-07	3,00E-07

Fonte: A autora

Tabela 12: Estimativa das taxas de dose na Classe de estabilidade atmosférica C

Distância (Km)	Coeficiente de rugosidade do solo (cm) / Taxa de Dose (Sv/h)					
	CLASSE PG C					
	3	10	20	40	80	160
0,5	4,20E-04	3,40E-04	3,00E-04	2,70E-04	2,30E-04	2,10E-04
1,0	1,10E-04	9,00E-05	8,00E-05	7,00E-05	6,20E-05	5,40E-05
6,0	4,60E-06	3,80E-06	3,40E-06	3,00E-06	2,70E-06	2,40E-06
10,0	2,10E-06	1,80E-06	1,60E-06	1,40E-06	1,30E-06	1,10E-06

Fonte: A autora

Tabela 13: Estimativa das taxas de dose na Classe de estabilidade atmosférica D

Distância (Km)	Coeficiente de rugosidade do solo (cm) / Taxa de Dose (Sv/h)					
	CLASSE PG D					
	3	10	20	40	80	160
0,5	9,80E-04	8,10E-04	7,20E-04	6,40E-04	5,60E-04	5,00E-04
1,0	2,90E-04	2,40E-04	2,10E-04	1,90E-04	1,70E-04	1,50E-04
6,0	1,60E-05	1,40E-05	1,20E-05	1,10E-05	1,00E-05	9,10E-06
10,0	7,40E-06	6,50E-06	6,00E-06	5,50E-06	5,00E-06	4,50E-06

Fonte: A autora

Tabela 14: Estimativa das taxas de dose na Classe de estabilidade atmosférica E

Distância (Km)	Coeficiente de rugosidade do solo (cm) / Taxa de Dose (Sv/h)					
	CLASSE PG E					
	3	10	20	40	80	160
0,5	2,20E-03	2,00E-03	1,80E-03	1,70E-03	1,50E-03	1,40E-03
1,0	5,80E-04	5,20E-04	4,90E-04	4,50E-04	4,10E-04	3,80E-04
6,0	2,60E-05	2,60E-05	2,50E-05	2,40E-05	2,30E-05	2,20E-05
10,0	1,20E-05	1,30E-05	1,30E-05	1,30E-05	1,20E-05	1,20E-05

Fonte: A autora

Tabela 15: Estimativa das taxas de dose na Classe de estabilidade atmosférica F

Distância (Km)	Coeficiente de rugosidade do solo (cm) / Taxa de Dose (Sv/h)					
	CLASSE PG F					
	3	10	20	40	80	160
0,5	3,50E-03	3,80E-03	3,80E-03	3,80E-03	3,70E-03	3,50E-03
1,0	7,50E-04	8,60E-04	9,00E-04	9,10E-04	9,10E-04	8,90E-04
6,0	1,60E-05	2,40E-05	2,80E-05	3,20E-05	3,50E-05	3,70E-05
10,0	5,80E-06	9,50E-06	1,20E-05	1,40E-05	1,60E-05	1,70E-05

Fonte: A autora

Os resultados permitem avaliar a taxa de dose de radiação em um determinado ponto de interesse no terreno. Os dados permitem estimar os riscos radiológicos associados.

Os resultados da figura 20 sugerem que as Classes E e F contribuem mais fortemente para a taxa de dose de radiação do solo quando comparadas com todas as outras Classes.

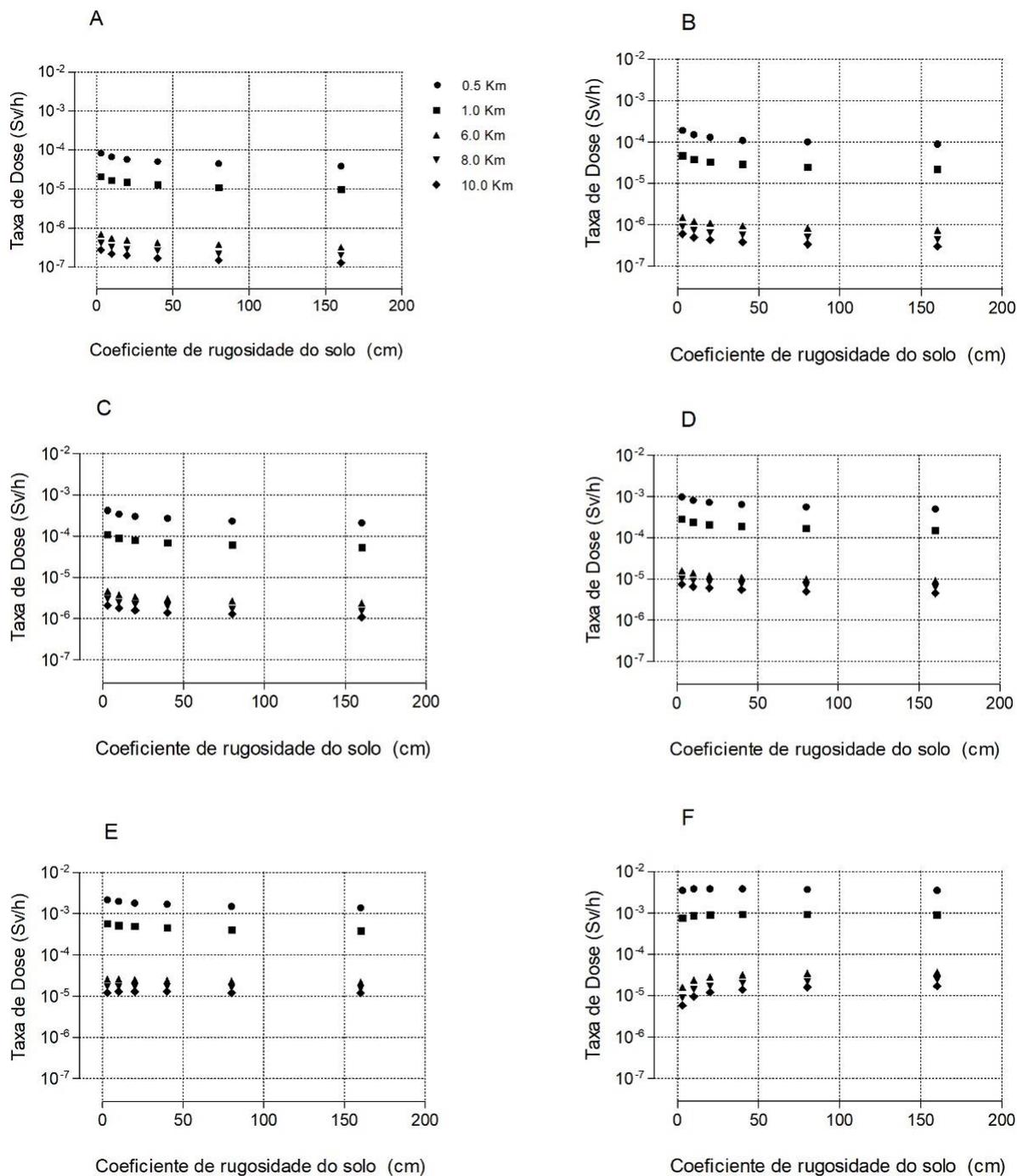


Figura 20: Taxa de dose de radiação $\left[\frac{Sv}{h}\right]$ em função das distâncias [km] e coeficientes de rugosidade do solo [cm] para cada Classe (A-F)

Fonte: A autora

Pode ser observado que quanto mais estável a Classe PG, maior a probabilidade do aumento da taxa de dose de radiação, assim como quanto menor o coeficiente de rugosidade do solo, a taxa de dose tende a ser maior.

Desta forma, os tomadores de decisão levarão em conta as mudanças das classes de estabilidade atmosférica local, pois podem influenciar a estrutura da resposta e o suporte logístico. Esta influência das Classes PG na taxa de dose tem efeito combinado com a rugosidade do solo.

O aumento da turbulência (fator de maior importância na dispersão vertical de substâncias radioativas liberadas na atmosfera HOMANN,2013) gerada pela variação da rugosidade de superfície pode elevar a taxa de depleção da pluma de contaminação, que neste estudo refere-se à concentração normalizada ao nível do solo, a favor do vento (*downwind*), a partir de uma fonte radioativa (HOMANN, 2013). Este fenômeno pode ser associado aos resultados obtidos, quando observado para classes mais instáveis o decréscimo da taxa de radiação do solo, que pode ser consequência da depleção do radionuclídeo no solo em camadas mais profundas, podendo por este motivo, blindar a radiação.

Mesmo sendo considerado um cenário padrão genérico para este estudo, é curioso destacar que o comportamento do Césio-137 varia de acordo com a classificação do solo. No caso de solos minerais, até 90% do Césio-137 é encontrado nos primeiros 5 cm. (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 apud UNSCEAR, 2000). Em solos de florestas, estudos apontam uma concentração maior de Césio-137 em camadas entre 3 e 5 cm. Abaixo de 35 cm este radionuclídeo geralmente não é detectado. (VETERE, MARIA INÊS DE C., 2002 apud COUGHTREY E THORNE, 1983A).

Embora as classificações do solo não tenham sido levadas em consideração para a avaliação dos resultados, foi observado que em diversos cenários, com diferentes tipos de solos, a concentração do Césio-137 é maior em coeficientes menores, indo de encontro com os resultados obtidos neste estudo. Sugere-se também, que as classes podem alterar a velocidade de migração do radionuclídeo no solo, influenciando diretamente na sua concentração, o que resulta na taxa de radiação da superfície.

Nota-se que quanto menor o coeficiente de rugosidade do solo, maior a taxa de dose de radiação. De acordo com a figura 27, as maiores taxas de dose de radiação encontram-se entre 0-10 cm, tornando-se constantes a maiores profundidades. Este resultado pode ser considerado dentro do esperado quando comparado com os termos da FGR 13 para exposição externa por contaminação da superfície (FGR 13, 1999).

4.4. Estimativa do risco de SAR em função dos coeficientes de rugosidade do solo e das distâncias para cada Classe PG (A-F) durante 4 dias

O Risco foi representado em função das distâncias (0,5km; 1,0km; 6,0km e 10km) e dos coeficientes de rugosidade do solo (3m, 10cm, 20cm, 40cm, 80cm e 160cm) para cada Classe PG (A-F). Os resultados a seguir estimam seu comportamento, permitindo a avaliação da ameaça (taxa de dose) e vulnerabilidade, que foi considerada como o tempo estimado para atingir 0,7 Sv.

Tabela 16: Estimativa do risco no ponto A

Distância (Km)	Risco na CLASSE PG A					
	3	10	20	40	80	160
0,5	8,33E+03	1,04E+04	1,21E+04	1,37E+04	1,56E+04	1,79E+04
1,0	3,33E+04	4,12E+04	4,67E+04	5,38E+04	6,36E+04	7,07E+04
6,0	1,00E+06	1,25E+06	1,43E+06	1,63E+06	1,84E+06	2,12E+06
10,0	2,50E+06	3,18E+06	3,50E+06	4,12E+06	4,67E+06	5,38E+06

Fonte: A autora

Tabela 17: Estimativa do risco no ponto B

Distância (Km)	Risco na CLASSE PG B					
	3	10	20	40	80	160
0,5	3,68E+03	4,67E+03	5,38E+03	6,36E+03	7,00E+03	7,95E+03
1,0	1,49E+04	1,84E+04	2,12E+04	2,41E+04	2,80E+04	3,18E+04
6,0	4,67E+05	5,83E+05	6,36E+05	7,37E+05	8,33E+05	9,46E+05
10,0	1,17E+06	1,43E+06	1,63E+06	1,84E+06	2,06E+06	2,33E+06

Fonte: A autora

Tabela 18: Estimativa do risco no ponto C

Distância (Km)	Risco na CLASSE PG C					
	3	10	20	40	80	160
0,5	1,67E+03	2,06E+03	2,33E+03	2,59E+03	3,04E+03	3,33E+03
1,0	6,36E+03	7,78E+03	8,75E+03	1,00E+04	1,13E+04	1,30E+04
6,0	1,52E+05	1,84E+05	2,06E+05	2,33E+05	2,59E+05	2,92E+05
10,0	3,33E+05	3,89E+05	4,38E+05	5,00E+05	5,38E+05	6,36E+05

Fonte: A autora

Tabela 19: Estimativa do risco no ponto D

Distância (Km)	Risco na CLASSE PG D					
	3	10	20	40	80	160
0,5	7,14E+02	8,64E+02	9,72E+02	1,09E+03	1,25E+03	1,40E+03
1,0	2,41E+03	2,92E+03	3,33E+03	3,68E+03	4,12E+03	4,67E+03
6,0	4,38E+04	5,00E+04	5,83E+04	6,36E+04	7,00E+04	7,69E+04
10,0	9,46E+04	1,08E+05	1,17E+05	1,27E+05	1,40E+05	1,56E+05

Fonte: A autora

Tabela 20: Estimativa do risco no ponto E

Distância (Km)	Risco na CLASSE PG E					
	3	10	20	40	80	160
0,5	3,18E+02	3,50E+02	3,89E+02	4,12E+02	4,67E+02	5,00E+02
1,0	1,21E+03	1,35E+03	1,43E+03	1,56E+03	1,71E+03	1,84E+03
6,0	2,69E+04	2,69E+04	2,80E+04	2,92E+04	3,04E+04	3,18E+04
10,0	5,83E+04	5,38E+04	5,38E+04	5,38E+04	5,83E+04	5,83E+04

Fonte: A autora

Tabela 21: Estimativa do risco no ponto F

Distância (Km)	Risco na CLASSE PG F					
	3	10	20	40	80	160
0,5	2,00E+02	1,84E+02	1,84E+02	1,84E+02	1,89E+02	2,00E+02
1,0	9,33E+02	8,14E+02	7,78E+02	7,69E+02	7,69E+02	7,87E+02
6,0	4,38E+04	2,92E+04	2,50E+04	2,19E+04	2,00E+04	1,89E+04
10,0	1,21E+05	7,37E+04	5,83E+04	5,00E+04	4,38E+04	4,12E+04

Fonte: A autora

O risco foi calculado a partir da Taxa de Dose de radiação da superfície do solo que leva um indivíduo aos sintomas da SAR, considerando o tempo para atingir 0,7 Sv, que indica a estimativa do Risco (CNEN, 2015).

Os riscos estimados decorrentes do evento são mostrados na figura 21 em função das Classes PG e coeficientes de rugosidade do solo para diferentes distâncias. É importante notar que quanto menor o tempo para atingir 0,7 Sv, maior é o risco dos sintomas da SAR.

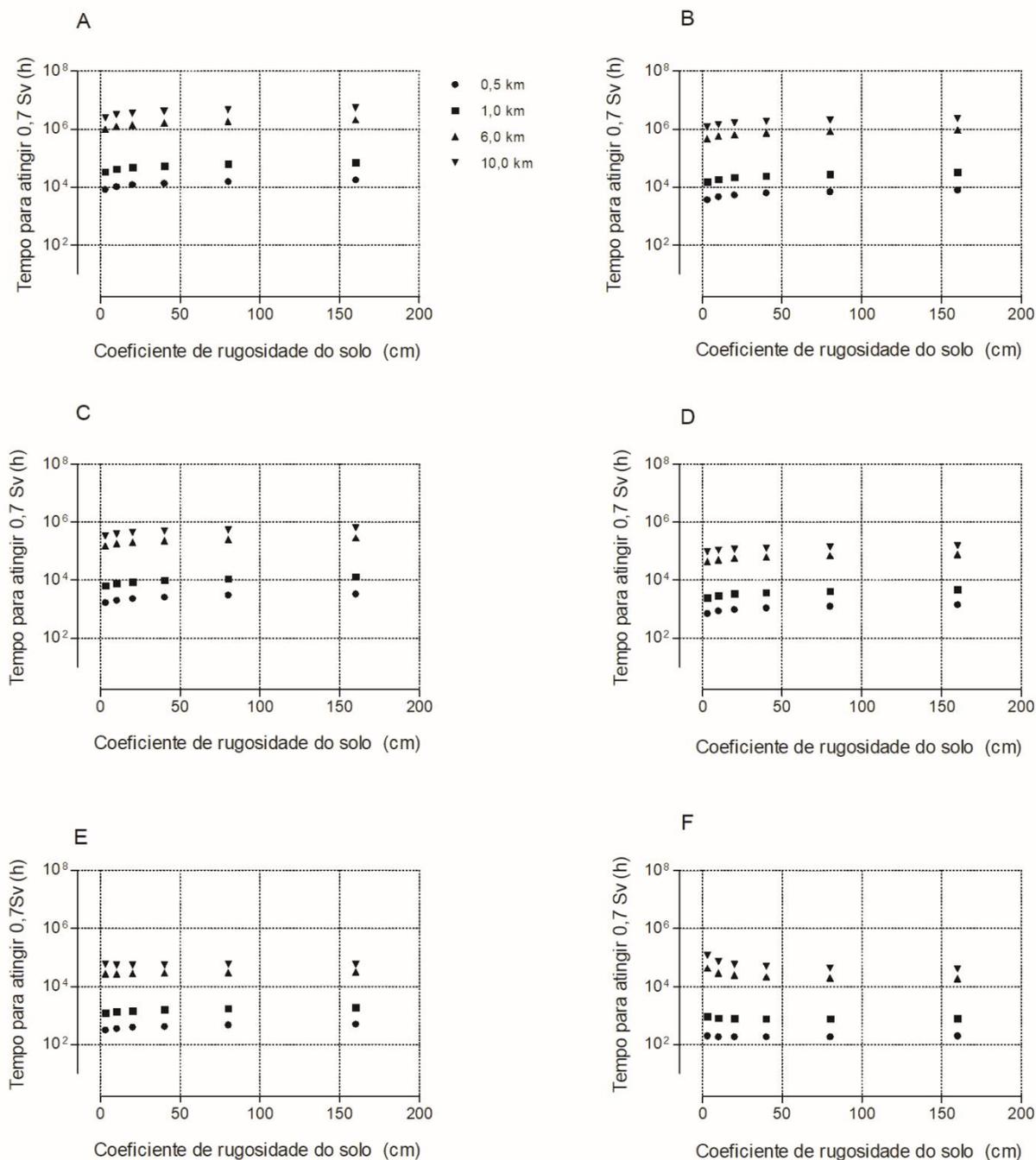


Figura 21: Estimativa do risco em função dos coeficientes de rugosidade do solo e das distâncias para cada Classe PG (A-F).

Fonte: A autora

Sugere-se que este perfil varia dependendo da distância do local de dispersão. A figura 21 mostra um comportamento decrescente em todas as Classes PG e coeficientes de rugosidade do solo. Foi observado que para uma

mesma distância, quanto mais estável a classe, menor o tempo [h] para atingir 0,7 Sv, logo, maior o risco estimado. Assim como, para o mesmo coeficiente de rugosidade do solo, quanto mais estável a classe, o tempo [h] tende a ser menor para atingir 0,7 Sv.

Independentemente das variações do risco para diferentes Classes PG, uma influência significativa de diferentes níveis de coeficientes de rugosidade em diferentes distâncias é observada.

Os riscos estimados podem ser tomados como insumo valioso para tomada de decisão. Tais fatores sugerem que os riscos aumentam linearmente para pequenas distâncias, para todos os coeficientes de rugosidade do solo. Essas informações podem ser balizadoras para o planejamento da resposta à emergência e podem ser um refinamento no conceito comumente aplicado nestas situações.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo podem ser usados para aprimorar o processo de avaliação do risco que possibilita aos tomadores de decisão um melhor parâmetro de visão do cenário em uma resposta para mitigar as consequências de um evento de RDD possibilitando o alcance da adequação e eficácia dos controles em uso.

Os resultados sugerem que as Classes PG, a rugosidade do solo e as distâncias de liberação influenciam o risco de desenvolvimento de problemas ambientais e de saúde humana devido à exposição radiológica. Além disso, os resultados indicam um efeito combinado entre tais variáveis com ênfase na interação entre as Classes PG e rugosidade do solo no risco. Este trabalho apresenta uma avaliação da influência de fatores externos no processo de contaminação ambiental. Os resultados destacam a necessidade de que as condições ambientais sejam devidamente consideradas neste cenário quando a avaliação preliminar de riscos é realizada. Além disso, eles também sugerem que a comunicação de risco não deve se basear somente na ameaça em si, mas também deve incluir condições ambientais e características que possam funcionar sinergicamente, alterando a percepção de risco. Além disso, considerar a rugosidade do solo e as variações das Classes PG na vizinhança

de instalações nucleares pode ser relevante para a modelagem de consequências para potenciais acidentes com impacto na efetividade das ações de resposta e tomada de decisão.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

A metodologia utilizada para realizar este trabalho permite futuramente o desenvolvimento de novas pesquisas envolvendo outros radionuclídeos e seus comportamentos no solo. Além dos coeficientes de rugosidade, trabalhos podem ser desenvolvidos avaliando o comportamento dos contaminantes considerando diferentes classificações do solo.

Este trabalho introduz a fundamentação sobre a dispersão de radionuclídeos em camadas de mistura, tornando possível a continuidade nesta vertente.

7. REFERÊNCIAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY, ATSDR - **Toxicological Profile for Cesium**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. 2004. Disponível em < <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp157.pdf> > Acesso em 10 Fev. 2019.

AHMED & BHARAT, **Wind Field Modifications in Habitable Urban Areas**. Department of Architecture and Planning, M.A.National Institute of Technology, Bhopal, India. 2012

A.KERR – **Modelamentos de Poluição do ar**. USP SP, 2001. Disponível em < https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4098178/mod_resource/content/1/Polu5_2006difusao.pdf > Acesso em 11 Jul. 2019.

ARAÚJO, O. M., - **Análise de risco ocupacional por convergência e modelagem de consequências em um cenário RDD: Mapeamento de risco de câncer sólido**. Rio de Janeiro, IME. 2015.

ATTIX, F.H., **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**, 4a edição, USA, Wiley-VCH, 1986.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, CDC – **Acute Radiation Syndrome (ARS): A Fact Sheet for the Public**. U.S. Department of Health & Human Services, USA. 2018. Disponível em < https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/ars.htm?CDC_AA_refVal=https%3A%2F%2Femergency.cdc.gov%2Fradiation%2Fars.asp > Acesso em 27 Mar. 2019.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN – **Apostila educativa : Radiações Ionizantes e a Vida**. Rio de Janeiro: CNEN. 2015. Disponível em < <http://www.cnem.gov.br/component/content/article?id=151> > Acesso em 26 Jun. 2019.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN – **Norma CNEN-NN 3.01. Resolução 164/14. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica – Exposição do público.** Rio de Janeiro: CNEN. 2014. Disponível em < <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf> > Acesso em 03 Dez. 2018.

ELÓI PANASHUKI, **Rugosidade Superficial do Solo e Índices relacionados, sob diferentes sistemas de manejo.** Dourados, Mato Grosso do Sul. 2008. Disponível em < <http://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/MESTRADO-DOUTORADO-AGRONOMIA/Tese%20EI%C3%B3i%20Panachuki.pdf>> Acesso em 15 Fev. 2019.

ENVEX E SIMILAR – **Estudo da Dispersão Atmosférica de Poluentes, Utilizando o Modelo ISCST3 (Industrial Source Coplex) para a Usina Termoelétrica de Agudos do Sul.** Agudos do Sul PR, 2009. Disponível em < http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/EIA_RIMA/USINA_TERMOELETRICA_KCC/Estudo_de_Dispersao_Atmosferica_KCC_22102009.pdf > Acesso em 10 Jul. 2019.

FEDERAL GUIDANCE REPORT No. 13, FGR 13 – **Cancer Risk for Environmental Exposure to Radionuclides.** Washington, DC. United States Environmental Protection Agency. 1999. Disponível em < <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-99-001.pdf> > Acesso em 20 Abr. 2019.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE – **Política de Gestão de Riscos do IBGE.** Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, Rio de Janeiro. 2018. Disponível em <

https://www.ibge.gov.br/np_download/novoportal/documentos_institucionais/PoliticaRiscosIBGE.pdf > Acesso em 05 Dez. 2018.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION No. 18, ICRP 18 - **Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions. Radiation Protection Context.** National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine. 2012. Disponível em < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22925378> > Acesso em 16 Abr. 2019.

JOHN E. TILL & HELLEN A. GROGAN, **Radiological Risk Assessment and Environmental Analysis**, University Press, Oxford, 2008.

JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J, **Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation.** Elsevier Science B.V.2002. Disponível em < https://www.academia.edu/15020591/Frequency_normalised_wavelet_transform_for_surface_roughness_analysis_and_characterisation > Acesso em 01 Fev. 2019.

LABORATÓRIO DE ESTUDOS EM MODELAGEM E MONITORAMENTO AMBIENTAL, LEMMA – **Conceitos de Estabilidade Atmosférica e Dispersão Atmosférica.** PPGMNE – UFPR. 2004. Disponível em < http://www.lemma.ufpr.br/wiki/images/e/ed/Cynara_2.pdf > Acesso em 13 Nov. 2018.

MARIA LUIZA C. MARTINS, JANAINA T.G.S.B. DE OLIVEIRA., **Um modelo de Gestão de Riscos para a Regulamentação.** In: VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2012. Disponível em < <http://www.inovarse.org/filebrowser/download/16004> > Acesso em 05 Dez. 2018.

OKUNO, E., - **Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia.** IF- USP, Harbra. 2013. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142013000100014> Acesso em 27 Mar. 2019.

REMM - **Radiation Emergency Medical Management. Radiological Dispersal Device.** Washington: U.S. Department of Health & Human Services. 2019. Disponível em: <<https://www.remm.nlm.gov/rdd.htm#about>> Acesso em 01 Jan. 2019.

REMM - **Radiation Emergency Medical Management. Radiological Dispersal Device.** Washington: U.S. Department of Health & Human Services. 2019. Disponível em: <<https://www.remm.nlm.gov/rdd.htm#isotopes>> Acesso em 01 Jan. 2019.

TADANO, YARA DE SOUZA – **Simulação da Dispersão de Poluentes Atmosféricos para a Aplicação em Análise de Impacto.** Universidade Estadual de Campinas, 2012. Disponível em <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265147/1/Tadano_YaradeSouza_D.pdf> Acesso em 10 Jul. 2019.

TAUHATA et al., **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, 9a edição, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, CNEN, Rio De Janeiro, 2013.

VETERE, MARIA INÊS DE C., - **Avaliação do Comportamento de Isótopos de Césio, Iodo, Estrôncio e Rutênio em Áreas Urbanas, após Contaminação por Liberação Acidental**, IRD, Rio de Janeiro, 2002.