



Saúde em Debate

ISSN: 0103-1104

ISSN: 2358-2898

Centro Brasileiro de Estudos de Saúde

Pereira, Adriana Paula Macedo Ferreira; Rodrigues, Luiz Antonio da Costa; Santos, Elaine Alves dos; Cardoso, Telma Abdalla de Oliveira; Cohen, Simone Cynamon
Gestão de eventos QBRN e a utilização do modelo Hysplit: uma revisão integrativa de literatura
Saúde em Debate, vol. 43, núm. 122, 2019, Julho-Setembro, pp. 925-938
Centro Brasileiro de Estudos de Saúde

DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-1104201912221>

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=406369178022>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais informações do artigo
- Site da revista em redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Informação Científica Redalyc
Rede de Revistas Científicas da América Latina e do Caribe, Espanha e Portugal
Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa
acesso aberto

Gestão de eventos QBRN e a utilização do modelo Hysplit: uma revisão integrativa de literatura

CBRN events management and the use of the Hysplit model: an integrative literature review

Adriana Paula Macedo Ferreira Pereira^{1,2}, Luiz Antonio da Costa Rodrigues^{1,3}, Elaine Alves dos Santos⁴, Telma Abdalla de Oliveira Cardoso², Simone Cynamon Cohen²

DOI: 10.1590/0103-1104201912221

RESUMO O potencial risco de exposição das populações aos agentes Químicos, Biológicos, Radioativos e Nucleares (QBRN), seja por causas intencionais ou não, configura-se como questão de segurança nacional e demanda um constante aprimoramento do seu gerenciamento. Os modelos de dispersão atmosférica vêm ganhando destaque como ferramenta de apoio à gestão dos riscos aos agentes QBRN. O objetivo desta pesquisa foi identificar e avaliar estudos que utilizaram o modelo Hysplit no contexto de eventos QBRN. Para tanto, foi realizada uma revisão integrativa de literatura de artigos publicados entre 2014 e 2018, nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e Lilacs. A análise dos artigos selecionados permitiu verificar o potencial do uso do modelo Hysplit, enquanto modelo matemático, para compreender o transporte, a dispersão e a deposição de ameaças QBRN liberadas na atmosfera. Os dados produzidos pelas simulações geradas por esse código podem revelar quais áreas serão potencialmente impactadas em um determinado evento ou a região de origem de elementos dispersos no ar. Ademais, o Hysplit pode ser agregado como uma ferramenta de suporte às decisões perante as distintas fases da gestão de eventos QBRN.

PALAVRAS-CHAVE Dispersão de poluentes. Espalhamento de radiação. Acidentes e eventos químicos. Liberação nociva de radioativos. Gestão de riscos.

ABSTRACT The potential risk of exposure of populations to Chemical, Biological, Radioactive and Nuclear agents (CBRN), either by intentional causes or not, is a matter of national security and demands a constant improvement in its management. The models of atmospheric dispersion have been gaining prominence as a tool to support the management of risks to CBRN agents. The objective of this research was to identify and evaluate studies that used the Hysplit model in the context of CBRN events. For this purpose, an integrative literature review of published articles was conducted between 2014 and 2018, from the PubMed, Scopus, Web of Science and Lilacs databases. The analysis of the selected articles revealed the potential of the Hysplit model, as a mathematical model, to understand the transport, dispersion and deposition of CBRN threats released into the atmosphere. The data produced by the simulations generated by this code can reveal which areas will be potentially impacted in a given event or the region of origin of elements dispersed in the air. In addition, Hysplit can be aggregated as a decisions support tool in the different phases of CBRN event management.

KEYWORDS Pollutants dispersion. Scattering radiation. Chemical accidents and events. Radioactive hazard release. Risk management.

¹Marinha do Brasil, Hospital Naval Marcílio Dias (HNMD), Instituto de Pesquisas Biomédicas (IPB) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.
apereira.ioc@gmail.com

²Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca (Ensp), Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental (DSSA) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

³Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Museu Nacional, Laboratório Professor Álvaro Xavier Moreira – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

⁴Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (Lagir) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.



Introdução

A evolução da sociedade e o avanço dos processos tecnológicos e industriais demandam a fabricação ou a manipulação de um relevante quantitativo de substâncias químicas, agentes biológicos e elementos radioativos¹. Os rápidos avanços dos conhecimentos científicos e tecnológicos, aliados ao desenvolvimento da indústria, à expansão da capacidade de geração de energia, ao aumento da produtividade agrícola, da engenharia de alimentos, entre outros, foram acompanhados pela maior exposição aos riscos ocasionados por agentes Químicos, Biológicos, Radioativos e Nucleares (QBRN). Porém, houve, também, o aperfeiçoamento das estratégias de cuidados com a saúde laboral e a melhoria dos diagnósticos e cuidados da saúde humana e animal².

O uso de agentes de riscos físicos, químicos e biológicos em ambientes e em concentrações capazes de causar agravos à saúde humana ou ocasionar óbitos transcende a dimensão laboral. Historicamente, registra-se a utilização desses agentes em disputas territoriais, religiosas, sociais e culturais. Enumeram-se tais usos desde a Antiguidade até a I e a II Guerras Mundiais, perpassando os mais contemporâneos atentados terroristas, tais como: a dispersão de antraz e ricina em cartas endereçadas a políticos americanos (2001, 2003, 2004, 2013 e 2018); a detonação de dispositivos explosivos improvisados durante a Maratona de Boston, nos Estados Unidos (2013), nos arredores do Stade de France, na cidade de Saint-Denis, na França (2015), e dentro do Aeroporto de Bruxelas, na Bélgica (2016); os ataques com gás sarin no metrô de Tóquio, no Japão (1995), e com produto químico contendo cloro reativo em Douma, na Síria (2018).

Em um contexto distinto, apontam-se os furtos de fontes ou de materiais radiológicos, como o acidente ocorrido em Goiânia, em 1987, com césio-137, que ainda é considerado um dos maiores desastres radiológicos do mundo.

Sob outras circunstâncias, existe, ainda, a possibilidade de desastres, como inundações,

terremotos, deslizamentos, explosões desencadearem eventos por agentes QBRN *a posteriori*, como o ocorrido na Usina Nuclear de Fukushima, em 11 de março de 2011, quando foi atingida por um tsunami originado de um terremoto que ocorreu na costa litorânea do Japão.

Todos esses aspectos demonstram como as populações estão expostas aos riscos de acidentes, incidentes e desastres envolvendo substâncias químicas, agentes biológicos, elementos radiológicos e nucleares (QBRN). Além disso, os impactos desses eventos podem resultar em perdas humanas, ambientais, econômicas e sociais, que se traduzem numa situação de emergência em saúde pública e podem levar décadas para serem sanados³. Desta forma, a capacidade e a habilidade técnica para detectar rapidamente um ataque com agentes QBRN são de suma importância na ação de resposta, de modo a proteger os indivíduos e o ambiente.

A gestão de eventos de natureza QBRN ganha destaque nos cenários internacional e nacional, já que serve como arcabouço para o delineamento de políticas públicas, que orienta a criação e a manutenção de capacidades sustentáveis, bem como investimento, financiamento e planejamento de planos operacionais de resposta, melhorando o controle, a fiscalização, a troca de informações e a tomada de decisão⁴. Ela configura-se como uma questão de segurança nacional e de governança, que envolve diversos setores, incluindo, especialmente, a defesa, a ciência e a tecnologia, a saúde e o meio ambiente⁵.

O gerenciamento desses eventos é entendido como um processo cíclico, composto de etapas: (a) planejamento – relacionado com a avaliação do ambiente, vulnerabilidades, capacidades e riscos. A avaliação deve ser implementada antes e após os eventos, uma vez que determina a preparação e facilita a resposta e a recuperação; (b) preparação – etapa de implementação do plano e de mecanismos de prontidão por meio de treinamento, exercícios e certificação. As etapas de planejamento e preparação possuem como objetivo a redução de vulnerabilidades, que irão apoiar a prevenção

e a mitigação; (c) resposta – atua frente aos efeitos diretos, imediatos, de um evento QBRN, incluindo ações de preservação da saúde e da segurança, salvaguardando vidas; de prevenção do sofrimento humano; de proteção às propriedades e estabelecendo medidas de controle, a fim de prevenir ou reduzir a propagação da contaminação, lesão humana ou mortes, danos ambientais e danos materiais; (d) recuperação – só é iniciada após a contenção ou o controle dos riscos imediatos. A recuperação objetiva restaurar os serviços essenciais e concluir a mitigação do risco imediato⁶.

Componentes como comando, controle, comunicações, computadores, inteligência, vigilância e reconhecimento são considerados como requisitos fundamentais para uma força de resposta às ameaças QBRN, e o uso de sistemas de informação pode tornar toda a operação mais ágil, eficiente, inteligente e segura¹.

Dessa forma, para a gestão das ameaças QBRN, especialmente dos impactos dos agentes de dispersão aérea, os estudos de dispersão atmosférica são fundamentais no apoio à tomada de decisão, relativos à avaliação de cenários e à modelagem das consequências para equipes responsáveis pela ação de primeira resposta a emergências QBRN e para a população de um modo geral. Os modelos de dispersão podem auxiliar no entendimento dos mecanismos de disseminação de agentes capazes de causar danos em escala local, regional e global; e, desse modo, fazer previsões dos impactos das emissões na troposfera, seja tal impacto causado por fontes fixas ou por fontes móveis. Esses modelos utilizam equações matemáticas para descrever a atmosfera, a dispersão e os processos físicos e químicos que acontecem com uma pluma emitida por uma determinada fonte.

Entre as metodologias mais consagradas, encontram-se as análises físico-químicas e biológicas de amostras de ar, bem como a avaliação da deposição dessas amostras em corpos d'água ou no solo e seus possíveis efeitos^{7,8}. No entanto, com o avanço da ciência de dados e do potencial de processamento de grandes

volumes de informações, a utilização de modelos computacionais capazes de analisar as diversas dimensões de inúmeras substâncias frente às distintas situações vem ganhando destaque, principalmente por conseguir incorporar noções de cenários reais e hipotéticos⁹.

Os Modelos de Transporte Atmosférico, Dispersão e Deposição Atmosférica (MTADD) descrevem o transporte, no espaço e no tempo, de gases e partículas veiculados em massas de ar na atmosfera, incluindo poluentes químicos, matéria radioativa, material particulado, como poeira e bioaerossóis. A modelagem com uso de ferramentas lógicas oferece diferentes modelos de saídas de dados, desde modelos de plumas gaussianas até modelos muito complexos, baseados em Dinâmicas Computacionais de Fluidos (CFD, em inglês). Dessa forma, a escolha de um determinado modelo depende do objetivo do estudo, das substâncias envolvidas e da extensão e complexidade da área a ser avaliada^{7,10}.

Entre os MTADD mais conhecidos, estão: Atmospheric Dispersion Modelling System (ADMS), American Meteorological Society/United States Environmental Protection Agency Regulatory Model (Aermod), Areal Locations of Hazardous Atmospheres (Aloha), Californian Puff Model (Calpuff), Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (Hysplit), Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment (Name), Risø Mesoscale PUFF Model (Rimpuff).

Entre esses modelos, o Hysplit tem se destacado por ser uma plataforma de domínio público, eficaz para distintas classes de escalas atmosféricas, com interface gráfica do usuário de fácil utilização, rápido processamento e que dispõe de um módulo on-line¹¹. Os dados meteorológicos podem advir de medições *in situ*, de estações meteorológicas (locais) ou do Global Data Assimilation System (GDAS)⁹.

O GDAS é um banco de dados mundial de observação meteorológica que registra observações em um espaço modelado em uma grade de três dimensões. Apresenta a finalidade de iniciar ou inicializar previsões

meteorológicas com observações verificadas. Ele adiciona observações como dados de superfície, dados de balão, dados de perfil de vento, relatórios de aeronaves, observações de boias, observações de radar e observações de satélite^{9,12}.

Segundo o National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)⁹, o modelo Hysplit é um sistema completo para computar trajetórias simples de parcelas de ar, bem como complexas simulações de transporte, dispersão, transformação química e de deposição. Tem como uma das aplicações mais comuns a análise da trajetória posterior para determinar a origem das massas de ar e estabelecer relações termo-fonte e receptor. Adota um método híbrido de cálculo usando abordagem lagrangeana e a metodologia euleriana ou modelos *puff* e de partículas. Ele também é capaz de empregar modelos de CFD, úteis em terrenos complexos, como ambientes urbanos, onde as escalas espaciais de interesse estão próximas das escalas das características da paisagem.

Segundo Silva¹³, os modelos lagrangeanos descrevem a trajetória de cada partícula a partir de um referencial em movimento, e os modelos eulerianos descrevem os processos de dispersão através de um observador fixo com relação ao movimento da pluma.

Leelössy et al.¹⁴ afirmam que os modelos *puff* tratam os materiais dispersos como uma superposição de várias nuvens, com um determinado volume, e calculam as trajetórias desses '*puffs*'.

Estudos internacionais e nacionais revelam que o Hysplit tem sido empregado em uma variedade de simulações com o objetivo de descrever o transporte atmosférico, a dispersão e a deposição de poluentes e materiais perigosos⁹⁻¹³. Sendo assim, esse modelo apresenta-se como uma potencial ferramenta para auxiliar no delineamento das diversas fases da gestão de eventos QBRN.

Este artigo objetiva identificar e avaliar estudos que utilizaram o modelo Hysplit no contexto de eventos QBRN.

Metodologia

No presente estudo, selecionou-se como método um dos recursos da prática baseada em evidências, ou seja, a revisão integrativa da literatura, a qual possibilita a síntese e a análise do conhecimento científico já produzido sobre o tema, interconectando elementos isolados de estudos já existentes¹⁵.

O estudo foi delineado nas seguintes etapas: (1) estabelecimento da hipótese; (2) escolha dos critérios de elegibilidade, ou seja, de inclusão e exclusão; (3) identificação dos estudos pré-selecionados; (4) leitura integral dos artigos, extração dos dados e categorização dos estudos selecionados; (5) análise, interpretação e discussão dos resultados; e (6) apresentação da revisão/síntese do conhecimento.

Para nortear a revisão integrativa, formulou-se a seguinte questão: como o modelo Hysplit vem sendo utilizado no contexto da gestão de eventos QBRN?

Para a coleta de dados, foram utilizadas as bases: National Library of Medicine (PubMed), SciVerse Scopus (Scopus), Web of Science e Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (Lilacs).

A estratégia de busca utilizada nas referidas bases foi: ['Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model' OR Hysplit]. A busca e a seleção dos artigos foram realizadas nos títulos, resumos e palavras-chave, a partir dos critérios de inclusão e exclusão, por dois avaliadores independentes.

Além disso, o levantamento bibliográfico restringiu as buscas quanto aos idiomas de publicação (inglês, espanhol e português), quanto ao ano de publicação (2014 a 2018), quanto ao tipo de material publicado (artigos científicos e/ou artigos de revisão) e estudos que abordassem diretamente a utilização do modelo Hysplit em cenários de eventos QBRN.

Definiram-se como critérios de exclusão: artigos de conteúdo geral, ou seja, que tratavam de dispersão de poluentes atmosféricos, artigos que não retratassem diretamente os acidentes QBRN e artigos não disponibilizados na íntegra.

O *software* Endnote® foi utilizado para o gerenciamento das referências bibliográficas, pela facilidade de aplicação e disponibilidade na maioria das bases e dos periódicos. Auxiliou na importação e transferência direta dos estudos selecionados das bases pesquisadas para um arquivo específico da pesquisa.

Os artigos foram lidos na íntegra, e, para a análise, foram utilizados quadros de síntese especialmente construídos para esse fim, que contemplaram os seguintes aspectos, considerados pertinentes: dados relativos à autoria; ano de publicação; área do estudo; objetivo geral do trabalho; objetivo do uso do modelo Hysplit; e características metodológicas.

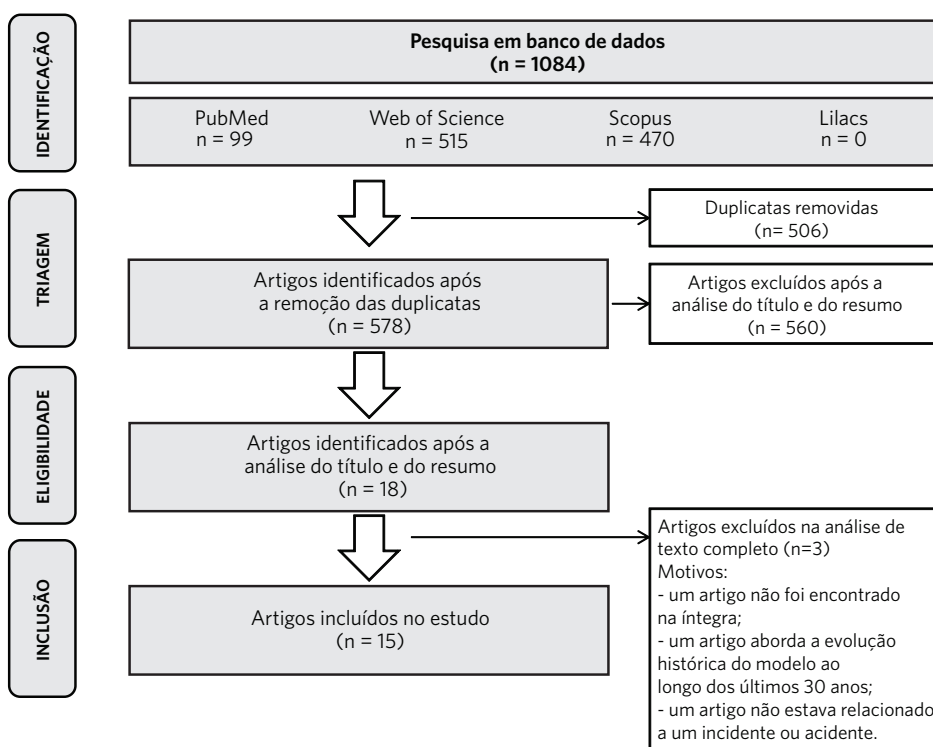
Foram realizadas reuniões de consenso com outros pesquisadores quando havia dúvidas sobre a inclusão de estudos na revisão. Os

estudos cujos resumos eram dúbios foram lidos na íntegra.

Resultados e discussão

Foi identificado um total de 1084 registros nas bases de dados consultadas, sendo que 506 duplicatas foram removidas, resultando em 578 estudos submetidos à triagem do título, resumo e das palavras-chave. Essa triagem inicial removeu 560 artigos que não atenderam aos critérios de elegibilidade. Posteriormente, após a leitura do texto completo dos 18 artigos eleitos, 3 foram excluídos (um artigo por não ter sido encontrado na íntegra; um por ser um artigo histórico; e outro por não estar relacionado com cenário incidental ou acidental), totalizando 15 artigos selecionados para este estudo (*figura 1*).

Figura 1. Fluxograma da seleção dos estudos



A descrição dos estudos incluídos na revisão é apresentada no *quadro 1*, como também a finalidade da utilização do Hysplit. Os principais locais de realização desses estudos foram a América do Norte (Estados Unidos e Canadá), a Europa (França e Alemanha) e a Ásia (Japão,

China, Coreia do Sul, Iran). Apenas um estudo foi realizado no Brasil, fato que pode estar relacionado com a maior ocorrência de eventos QBRN nos locais citados e por ocuparem posição de vanguarda do desenvolvimento científico e tecnológico.

Quadro 1. Descrição dos artigos incluídos na pesquisa

Referência (ano)	Local do estudo	Objetivos	Finalidade do uso do Hysplit
An et al. (2016)	Coreia do Sul	Avaliar a dispersão atmosférica de material radioativo (césio-137) de acordo com as condições climáticas locais e condições de emissão.	Analisar as características da dispersão radioativa na atmosfera.
Auxier, Auxier e Hall (2017)	Estados Unidos	Revisar e comparar os diferentes códigos que foram desenvolvidos para prever as consequências de armas químicas e nucleares.	O Hysplit apresenta a capacidade de previsão de precipitação nuclear.
Chai, Draxler e Stein (2015)	Estados Unidos; Canadá e Europa	Determinar se redes de monitoramento global podem ser usadas para quantificar variações temporais de emissões de um local de origem conhecido.	Auxiliar na criação de uma matriz de coeficiente de transferência (TCM) para testar um sistema de estimativa de emissão inversa.
Felsberg et al. (2018)	Alemanha e França	Avaliar a capacidade de simular a dispersão do kriptton-85 emitido por uma usina de reprocessamento de combustível nuclear no noroeste da França.	Simular o transporte de Kr-85 na Europa em três períodos de tempo.
GeYang e Ou (2018)	China	Conceber um conjunto de sistemas dinâmicos de vigilância contra acidentes químicos estruturado a partir da internet das coisas, adotando os princípios de rapidez, simplicidade e confiabilidade.	Simular quantitativamente o modelo de difusão de um determinado tipo de poluição atmosférica proveniente de um acidente químico.
Katata et al. (2015)	Japão	Estimar as liberações atmosféricas detalhadas durante o acidente da Usina Nuclear de Fukushima Daiichi usando um método de estimação reversa que calcula as taxas de liberação de radionuclídeos, comparando medidas de concentração de ar de um radionuclídeo ou sua taxa de dose no ambiente com as calculadas por transporte atmosférico e oceânico, modelos de dispersão e deposição.	Comparar as simulações numéricas de três modelos de dispersão atmosférica (Hysplit, MLDPO e Name) com as observações utilizando novas estimativas de termo fonte.
Leelossy et al. (2017)	Europa	Avaliar o desempenho dos modelos WRF-Chem Eulerian on-line, Hysplit e Raptor Lagrangian e apontar as incertezas em uma situação climática complexa na Europa Central, em 4 de novembro de 2011.	O Hysplit foi adotado como modelo de referência frente aos modelos WRF-Chem Eulerian on-line e Raptor Lagrangian para a simulação da dispersão da pluma radioativa e a distribuição espacial do I-131 na Europa Central.
Pirouzman, Kowsar e Dehghani (2018)	Iran	Simular as consequências de um apagão na estação de resfriamento da unidade da Usina Nuclear de Bushehr-1 e da posterior perda de grande quantidade de líquido utilizado neste processo.	Avaliar a dispersão de radionuclídeos e o transporte para um número limitado de produtos de fissão liberados sob um acidente hipotético.
Ramana, Nayyar e Schoepner (2016)	Índia	Descrever diferentes explosões químicas e examinar como tais explosões poderiam ocorrer na Usina de Reprocessamento de Kalpakkam e discutir os resultados de uma simulação da dispersão atmosférica, incluindo um cálculo da dose potencial de radiação para a população exposta.	Calcular a dispersão atmosférica de radioatividade de uma explosão em um tanque de resíduos de reprocessamento.
Rolph, Ngan e Draxler (2014)	Estados Unidos	Modelar a dispersão, deposição, decaimento de detritos nucleares e calcular as taxas de dose radioativa que se seguiram à detonação de seis dispositivos nucleares relativamente pequenos nos anos 1950, em Nevada.	Configurar o modelo com várias distribuições de tamanho de partícula e atividade, obtidas a partir de várias fontes publicadas, e calcular contornos de taxa de dose para vários testes nucleares no local estudado.

Quadro 1. (cont.)

Silva et al. (2018)	Brasil	Simular as trajetórias de massas de ar de dois estudos de caso: um evento natural (erupção do vulcão) e um acidente químico que gerou incêndio na região portuária de Guarujá, São Paulo.	Simular as trajetórias de massas de ar dos eventos analisados.
Simsek et al. (2014)	Europa; Turquia	Simular o transporte e a deposição de Cs-137 sobre a Europa que ocorreu após o acidente da Usina Nuclear de Chernobyl.	Calcular a deposição total de Cs-137 (úmida e seca) e as concentrações de ar superficial que ocorreram sobre a Europa e a Turquia após o acidente do reator nuclear de Chernobyl.
Vali et al. (2018)	Iran	Avaliar as doses de radiação para residentes na província de Teerã após um hipotético acidente no Reator de Pesquisa de Teerã (RPT), incluindo a determinação de quaisquer ações de proteção que possam ser necessárias para o benefício da saúde das pessoas.	Calcular a concentração de radionuclídeos no ar e a depositada na superfície do solo como resultado de uma liberação hipotética de radionuclídeos do RPT, após um cenário de acidente hipotético.
Wu et al. (2015)	China	Detectar a chegada de radionuclídeos através do transporte atmosférico após o acidente de usina nuclear Fukushima Daiichi em Lanzhou, China.	Simular o caminho das massas de ar do acidente de Fukushima que chegaram em Lanzhou, China.
Zhang et al. (2015)	Hungria	Investigar as variações temporais de radionuclídeos descarregados do acidente com usinas nucleares de Fukushima Daiichi, a partir de coletas de amostras de aerossóis em Osaka, Japão.	Verificar o transporte direto da massa de ar da área de Fukushima para a cidade de Osaka.

A maioria dos trabalhos expressou como objetivo principal a análise do transporte, da dispersão e da deposição de material QBRN na atmosfera, adotando Hysplit como ferramenta para predizer cenários hipotéticos e/ou confirmar o percurso, a extensão e os locais potencialmente impactados em caso de acidentes. Ressalta-se, também, a sinalização de que esse modelo pode ser empregado em uma ampla gama de simulações fora do contexto QBRN, como as erupções vulcânicas, queimadas, tempestades de areia¹¹.

Nesta revisão, doze artigos adotaram como metodologia a simulação, a partir de cenários reais, e quatro abordaram cenários hipotéticos. Entre os cenários reais, Katata et al., Wu et al. e Zhang et al.¹⁶⁻¹⁸ apresentaram resultados das simulações relacionados ao acidente em Fukushima, onde demonstraram que o modelo Hysplit foi capaz de representar o fenômeno de transporte e dispersão atmosférica, bem como a deposição de substâncias radioativas liberadas durante o acidente na usina nuclear impactada pelo tsunami.

Katata et al.¹⁶ estimaram as variações das liberações atmosféricas de radionuclídeos durante o evento. Segundo as simulações, durante os dias 15 e 16 de março, foram criadas as mais altas taxas de contaminação radioativa nas áreas ao redor da usina. Os autores relacionaram esse aumento às complicadas interações entre a precipitação, os movimentos das plumas e a variação temporal das taxas de liberação de iodo-131 e cézio-137.

Já Wu et al.¹⁷, além de simularem a transferência direta das massas de ar liberadas de Fukushima para China, cruzando o Oceano Pacífico, a América do Norte e a Europa, a uma altura próxima a 9.000 metros de altura acima do solo, apresentaram dados do programa de monitoramento de radioatividade em partículas atmosféricas da cidade chinesa de Lanzhou, que detectou e mensurou amostras de aerossol de 26 de março a 2 de maio de 2011. Os autores assumem que a contaminação ainda foi monitorada por um longo tempo, mas que nenhuma evidência de grandes flutuações no ar foi encontrada, a não ser em março de 2013, onde foi detectado

um aumento significativo na concentração de Cs-137 em amostras de aerossol durante um período de tempestade de areia.

Zhang et al.¹⁸ avaliaram a variação diária das concentrações de atividade de iodo-131, cézio-134 e cézio-137 na atmosfera na cidade de Osaka, no Japão, entre 15 de março e 11 de maio de 2011. Os autores observaram um aumento na concentração de atividade entre os dias 6 de abril e 17 de abril e o correlacionaram com o transporte direto da área de Fukushima, demonstrado pelas simulações de trajetória do modelo Hysplit.

Em outro contexto, mas também usando informações do acidente de Fukushima, Chai, Draxler e Stein²³ realizaram um levantamento de dados da concentração de cézio-137 no ar, provenientes de estações de monitoramento nos EUA, Canadá e Europa, para determinar se as redes de monitoramento global poderiam ser usadas para quantificar variações temporais de emissões de um local de origem conhecido. Os pesquisadores desenvolveram um sistema de estimativa de emissão inversa baseado em uma matriz de coeficiente de transferência, usando o modelo Hysplit, e um custo funcional que mede as diferenças entre as previsões do modelo e as medições reais da concentração de ar. Em comparação com outros estudos, a pesquisa demonstrou que o sistema criado conseguiu capturar com sucesso as principais variações temporais e identificar a maioria dos principais eventos no perfil temporal da liberação.

Além dos trabalhos que envolviam o acidente de Fukushima, foi encontrado um estudo relacionado ao acidente da Usina Nuclear de Chernobyl, ocorrido em 1986. Simsek et al.¹⁹ utilizaram o Hysplit para simular a deposição de cézio-137 sobre a Turquia, a partir dos dados do Atlas de Césio na Europa (publicado em 1998), que contém as informações do acidente, mas não contempla o território da Turquia. Os autores também estimaram as doses radiológicas efetivas de concentrações de ar e deposição simuladas, as quais chegaram a 0,15 milisievert (mSv)/ano na parte nordeste da

Turquia, o que revelou contaminação dentro dos limites admissíveis propostos pela Agência Internacional de Energia Atômica, que é de 1 mSv/ano para indivíduos em geral (não expostos ocupacionalmente).

Felsberg et al.²⁰ avaliaram a capacidade do Hysplit de simular a dispersão do radiokrypton-85 liberado por uma usina de reprocessamento de combustível nuclear no noroeste da França. Os pesquisadores apresentam que esse material é um importante marcador para testar o desempenho de modelos de dispersão atmosférica devido à sua meia-vida, inércia química e baixa solubilidade em água. Embora os resultados tenham demonstrado uma leve tendência de subestimar as concentrações encontradas, há uma correlação significativa e uma dispersão moderada entre observações e simulações.

Outra pesquisa abordou um cenário de acidente real ao investigar o vazamento e posterior incêndio de uma carga química contendo dicloroisocianurato de sódio dihidratado, nitrato de potássio, herbicidas, inseticidas, resinas e óleo isolante, em uma área de cargas empresariais do Porto de Guarujá, em São Paulo, em 14 de janeiro de 2016. Silva et al.²¹ simularam o espalhamento dos poluentes emitidos durante o evento e puderam verificar que, embora tivera um alcance pequeno, em escala regional, poderia gerar graves consequências para a saúde pública e ambiental da região do entorno do Porto, já que foram liberados diversos gases tóxicos.

Com relação aos cenários hipotéticos, An et al.²² usaram dados dos desastres nucleares de Chernobyl e de Fukushima, provenientes do Atmospheric Transport Model Evaluation Study e da Tokyo Electric Power Company, como base para avaliar as condições climáticas das áreas circunvizinhas e as condições de emissão de materiais radioativos em caso de acidentes na Usina Nuclear de Kori, situada na Coreia do Sul. O estudo demonstrou que, mesmo num raio próximo à usina, a distribuição e os níveis de concentração de cézio podem variar de acordo com a mudança das condições meteorológicas, com a topografia

da região e com o número de partículas emitidas. Os autores apontam que os principais resultados poderiam ser utilizados na formulação de medidas de prevenção eficientes e sistemáticas para desastres nucleares e na obtenção de respostas de emergência contra acidentes de radiação.

Ramana, Nayyar e Schoeppner²⁴ demonstraram os resultados de uma possível explosão na Usina de Reprocessamento de Kalpakkam, na Índia. Os cenários simulados de uma liberação radioativa, assumida como sendo 10% do inventário de apenas um dos tanques da usina, mostram que tal acidente poderia acarretar sérias consequências para a saúde pública, com quase 47.000 mortes relacionadas ao câncer, aumento na incidência dessa patologia em cerca de 97.000 casos e a contaminação de grandes áreas por décadas.

Pirouzmand, Kowsar e Dehghani²⁵ apresentam um estudo de caso da Usina Nuclear de Bushehr-1, no Iran, onde avaliaram a concentração atmosférica de 23 tipos de material radioativo liberados e as doses efetivas externas recebidas por populações dentro de um raio de 30 km da instalação. Os pesquisadores verificaram que as maiores doses seriam esperadas a 3 km ao norte e 4 km a noroeste da localização do reator, além disso, as doses efetivas máximas para os todos os cenários de emissão ultrapassaram de forma alarmante (no mínimo, mais de 40 vezes).

Também no Iran, Vali et al.²⁶ avaliaram os efeitos de um acidente hipotético após um terremoto na área próxima ao Reator de Pesquisas de Tehran, simulando a dispersão de elementos radioativos e calculando o total anual da dose equivalente efetiva que poderia ser recebida por residentes da cidade de Teerã e partes de suas províncias vizinhas. Porém, foi encontrado que as doses máximas se mostraram inferiores aos limites de dose adotados pelos órgãos regulatórios, e, dessa forma, não haveria necessidade de ação protetora caso ocorresse esse tipo de acidente.

O modelo Hysplit também foi confrontado com outros modelos de dispersão^{14,16,27}. Auxier,

Auxier e Hall²⁷ compararam os códigos Defense Land Fallout Interpretative Code (Delfic), Hazard Prediction and Assessment Capability (HPAC), Hysplit e Fallout Dispersion Code (FDC) para prever as consequências de armas químicas e nucleares com o intuito de diminuir o tempo de resposta para que o governo atue frente ao evento. Os autores afirmaram que, mesmo com algumas diferenças nos resultados, a maioria dos códigos analisados mostrou-se confiável, porém, os melhores modelos a serem usados na avaliação de um cenário de pós-detenção foram o FDC ou Delfic.

Katata et al.¹⁶ realizaram a comparação das simulações numéricas dos modelos Hysplit, Zeroth Order Lagrangian Dispersion Model (MLDPO) e Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment (Name) durante o acidente na Usina Nuclear de Fukushima Daiichi, em 2011. Os resultados obtidos demonstraram concordância com a concentração aérea de radionuclídeos e com a deposição superficial de césio-137 no leste do Japão.

Já Leelössy et al.¹⁴ adotaram o Hysplit como modelo de referência frente aos modelos WRF-Chem Eulerian on-line e Raptor Lagrangian para simular a dispersão da pluma radioativa e a distribuição do iodo-131 na Europa Central. No referido estudo foi possível verificar que a dispersão em escala continental é amplamente dominada pelas características atmosféricas e pela incerteza do vento. Além disso, os autores citam que o Hysplit foi extensivamente aplicado para pesquisa e apoio à decisão no caso do acidente de Fukushima.

Rolph, Ngan e Draxler²⁸ analisaram o modelo Hysplit contra as medidas de precipitação nuclear de seis testes nucleares conduzidos entre 1951 e 1957, em Nevada, nos Estados Unidos. Segundo os autores, o modelo foi capaz de reproduzir os padrões gerais de direção e deposição, porém, as simulações de plumas usando dados meteorológicos do Weather Research and Forecasting (WRF) tiveram desempenho mais consistente do que as simulações de plumas usando dados provenientes do National Centers for Environmental

Prediction/National Center for Atmospheric Research Reanalysis Project (NNRP).

GeYang e Ou²⁹ utilizaram o Hysplit como componente de um sistema de vigilância estruturado a partir do princípio da Internet das Coisas, conceito tecnológico em que objetos e condições do cotidiano estão conectados à internet. Esse sistema age de forma inteligente e sensorial, a partir da interação entre ‘mundo real’ e ‘mundo digital’. Esses mesmos autores sinalizam que essa integração tem efeitos positivos sobre riscos ambientais, já que possui forte acesso à informação, entrega e capacidade de solução.

Todos os artigos avaliados demonstraram a aplicabilidade e a multifuncionalidade do Hysplit, principalmente em razão de suas principais características: trabalhar com volume de cálculo menor e levar menos tempo para obter os resultados, em comparação com outros modelos de dispersão atmosférica. A utilização do modelo tanto em cenários hipotéticos quanto em cenários reais também revelou a competência desse código.

O *quadro 2* apresenta as principais características dos estudos selecionados, tais como: tipo de evento analisado; fase da gestão QBRN; escala espacial adotada; tipo de trajetória simulada; e origem dos dados meteorológicos.

Quadro 2. Caracterização dos estudos incluídos na pesquisa. Global Data Assimilation System (GDAS)

Características	Referência (ano)
Tipo de evento	
Químico	Auxier, Auxier e Hall (2017); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Silva et al. (2018); GeYang e Ou (2018).
Biológico	-
Radiológico/Nuclear	An et al. (2016); Auxier, Auxier e Hall (2017); Chai, Draxler e Stein (2015); Felsberg et al. (2018); Katata et al. (2015); Leelossy et al. (2017); Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Simsek et al. (2014); Vali et al. (2018); Wu et al. (2015); Zhang et al. (2015).
Fase da gestão	
Planejamento	An et al. (2016); Auxier, Auxier e Hall (2017); Chai, Draxler e Stein (2015); Felsberg et al. (2018); Katata et al. (2015); Leelossy et al. (2017); Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Rolph, Ngan, Draxler (2014); Simsek et al. (2014); Vali et al. (2018).
Preparação	Auxier, Auxier e Hall (2017); Leelossy et al. (2017); Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Vali et al. (2018).
Resposta	GeYang e Ou (2018); Silva et al. (2018); Wu et al. (2015); Zhang et al. (2015).
Recuperação	GeYang e Ou (2018); Wu et al. (2015).
Escala espacial	
Microescala	-
Média escala	-
Local	-
Urbana	An et al. (2016); Auxier, Auxier e Hall (2017); GeYang e Ou (2018); Felsberg et al. (2018); Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Silva et al. (2018); Vali et al. (2018).
Continental	Katata et al. (2015); Zhang et al. (2015).
Global	Chai, Draxler e Stein (2015); Katata et al. (2015); Leelossy et al. (2017); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Simsek et al. (2014); Wu et al. (2015).

Quadro 2. (cont.)

Trajeto	<i>Backward</i>	Katata et al. (2015); Wu et al. (2015).
	<i>Forward</i>	An et al. (2016); Auxier, Auxier e Hall (2017); Chai, Draxler e Stein (2015); Felsberg et al. (2018); GeYang e Ou (2018); Leelosy et al. (2017); Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Silva et al. (2018); Simsek et al. (2014); Vali et al. (2018); Zhang et al. (2015).
Dados meteorológicos	<i>In situ</i>	An et al. (2016); Vali et al. (2018).
	Bases de dados locais	Auxier, Auxier e Hall (2017); Felsberg et al. (2018); GeYang e Ou (2018); Katata et al. (2015); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Simsek et al. (2014).
	GDAS	Chai, Draxler e Stein (2015); Leelosy et al. (2017); Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Silva et al. (2018); Wu et al. (2015); Zhang et al. (2015).

Somente foram identificados artigos referentes ao transporte, à dispersão e à deposição de materiais radioativos ou químicos, como os eventos anteriormente mencionados (Fukushima, Chernobyl, incêndio no Porto de Guarujá, em São Paulo). Nenhum artigo abordou o contexto de agentes biológicos. Todavia, cabe ressaltar que, apesar desse resultado, já existem grupos de pesquisa demonstrando tal aplicação^{10,12,30}. Van Leuken et al.¹⁰ realizaram uma revisão acerca do uso de modelagens computacionais e dispersão de bioaerossóis; Jamolin et al.¹² adotaram o Hysplit para simular a liberação de esporos de antraz na área metropolitana de Washington. Prinslow³⁰ simulou a liberação do vírus ebola em distintas áreas dos Estados Unidos. Todos esses estudos demonstraram as capacidades e potencialidades do modelo Hysplit frente à simulação de bioaerossóis, porém, não fazem uma leitura profunda entre os seus resultados e a gestão de eventos QBRN.

Onze artigos apresentaram características da simulação mais relacionadas à fase de planejamento. Desses, quatro trabalhos estão potencialmente vinculados à fase de prevenção. Outros quatro trabalhos demonstraram a aplicabilidade do modelo, estando mais voltados para a fase de resposta, sendo que dois também estavam associados à fase

de recuperação. Perante as características do modelo e pelas informações apresentadas pelos artigos avaliados, considera-se que o Hysplit pode ser empregado durante todo o ciclo da gestão de eventos QBRN, como ferramenta de suporte na gestão de cenários que envolvam ameaças QBRN.

A variável referente às escalas espaciais foi subdividida, conforme a classificação de Oken (1998), nas categorias: microescala (10 a 100 m); média escala (100 m a 500 m); local (50 m a 4 km); urbana (4 a 100 km); regional (100 km a 1000 km); continental (1000 km a 10000 km); global >10000 km³¹. As escalas espaciais mais empregadas foram a urbana e a global (*quadro 2*).

Para simular os processos de transporte e dispersão, o tipo de trajetória mais adotado foi o *forward*. Esse tipo de trajetória possui a finalidade de descrever processos de transporte de massas de ar e foi adotado em 13 dos 15 artigos selecionados. A trajetória do tipo *backward*, cuja principal função é determinar a origem das massas de ar, foi utilizada em 2 estudos. Essas funções demonstram a multifuncionalidade do Hysplit.

Quanto à utilização dos dados meteorológicos, dois grupos de pesquisadores coletaram os dados no próprio local, seis empregaram bases de dados locais e sete artigos empregaram a

base de dados GDAS, o que demonstra a versatilidade do modelo com relação ao tipo de dado que os usuários podem adotar.

Todos os artigos avaliados citaram a relevância das informações geradas pelo Hysplit perante a preparação e a resposta frente a distintas ameaças QBRN, o que sinaliza que esse modelo pode ser uma ferramenta útil na gestão de eventos QBRN.

Conclusões

Esta revisão permitiu conhecer o potencial do uso do código Hysplit enquanto modelo matemático para compreender o transporte, a dispersão e a deposição de ameaças QBRN liberadas na atmosfera, que podem gerar graves consequências à saúde humana e impactar diversas matrizes ambientais.

Os artigos recuperados nesta revisão demonstraram as peculiaridades, capacidades, limitações, robustez e precisão do Hysplit em distintos contextos. Além disso, o Hysplit revelou-se como um recurso tecnológico mundialmente utilizado, principalmente em pesquisas vinculadas às ciências atmosféricas.

Os dados produzidos pelas simulações geradas por esse código podem revelar quais áreas são potencialmente impactadas em um determinado evento ou a região de origem de elementos dispersos no ar. Além disso, o Hysplit gera informações que podem corroborar outros instrumentos de avaliação de risco, como, por exemplo, a avaliação dose-resposta em uma determinada população exposta. Ele também demonstrou ser um interessante componente de sistemas de vigilância de acidentes

baseados em internet das coisas.

Ademais, o Hysplit pode ser agregado como uma ferramenta de suporte às decisões perante as distintas fases da gestão de eventos QBRN, auxiliando em atividades como: identificação de fontes emissoras; delimitação das zonas de segurança (quente, morna e fria); definição de rotas de fuga em processos de evacuação. Porém, este estudo revela a necessidade de ampliar o conhecimento teórico e prático desse modelo, particularmente, em âmbito nacional.

Colaboradores

Pereira APMF (0000-0002-7041-4255)* contribuiu para a concepção, o planejamento, a análise e a interpretação dos dados, bem como para a redação e para a aprovação da versão final do manuscrito. Rodrigues LAC (0000-0003-0025-4177)* contribuiu para a concepção, o planejamento, a análise e a interpretação dos dados, bem como para a elaboração do rascunho e revisão crítica do conteúdo. Santos EA (0000-0001-9620-9498)* contribuiu para a análise e a interpretação dos dados, revisão crítica do conteúdo e aprovação da versão final do manuscrito. Cardoso TAO (0000-0002-5430-7273)* contribuiu para a concepção, o planejamento, a análise e a interpretação dos dados, bem como para a revisão crítica do conteúdo e aprovação da versão final do manuscrito. Cohen SC (0000-0001-6228-6583)* contribuiu para a concepção, a análise, a interpretação dos dados, a revisão crítica do conteúdo e a aprovação da versão final do manuscrito. ■

*Orcid (Open Researcher and Contributor ID).

Referências

- Fortes MA. A política pública para respostas às ameaças químicas, biológicas, radiológicas, nucleares e nucleares explosivas. Fundação Getúlio Vargas [internet]. 2012 [acesso em 2018 jun 16]. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/10031/Dissertação_PP_ameaças_QBRNE.pdf.
- Almeida ME. A permanente relação entre biologia, poder e guerra: o uso dual do desenvolvimento biotecnológico. *Ciênc. Saúde Colet.* 2015; 20(7):2255-66.
- Brasil. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. Plano de Contingência para Emergência em Saúde Pública por Agentes Químico, Biológico, Radiológico e Nuclear. Brasília, DF: Ministério da Saúde; 2014.
- Government of Canada. Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and Explosives Resilience Strategy for Canada [internet]. 2011 [acesso em 2018 ago 24]. Disponível em: <https://www.publicsafety.gc.ca/cnt/rsrcs/pblctns/rslnc-strtg/rslnc-strtg-eng.pdf>.
- National Institute for Defense Studies Japan. East Asian Strategic Review [internet]. 2015 [acesso em 2018 nov 22]. Disponível em: http://www.nids.mod.go.jp/english/publication/east-asian/pdf/2015/east-asian_e2015_08.pdf.
- Department of the Army. Multi-service Tactics, Techniques, and Procedures for Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Consequence Management Operations [internet]. United States. Department of the Army. United States; 2015. [acesso em 2019 jan 16]. Disponível em: <https://www.hsdl.org/?abstract&did=786536>.
- Visscher AD. Air Dispersion Modeling: Foundations and Applications. Canada Research Chair in Air Quality and Pollution Control Engineering, Department of Chemical and Petroleum Engineering, and Centre for Environmental Engineering Research and Education (CEERE), Schulich School of Engineering, University of Calgary; 2014.
- Delort AM, Amato P. *Microbiology of Aerosols*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2018.
- Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, et al. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bull Am. Meteorol. Soc.* [internet]. 2015 [acesso em 2019 jan 20]. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- Van Leuken JPG, Swart AN, Havelaar AH, et al. Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock – A review to inform risk assessment studies. *Microb Risk Anal* [internet]. 2016; 1:19-39 [acesso em 2018 abr 25]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352352215000067>.
- Santos EA, Valeriano C M, Silva C. Associação entre poeira mineral e clima. *Terrae Didat.* 2018; 14(1):69-79.
- Jamolin K, Saltzman J, Schaefer D, et al. Improving the timeliness and response to an aerosolized Anthrax attack in the Metropolitan Washington, D.C. Region. Team BIOCOUNT at UMD in College Park, MD [internet]. 2013 [acesso em 2018 maio 20]. Disponível em: <https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/13877>.
- Silva C. Modelagem lagrangeana da dispersão atmosférica de radionuclídeos e sistemas de informação geográfica como ferramentas de suporte ao planejamento de emergência na área de influência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis – RJ. [tese] – Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2013.
- Leelosy Á, Mészáros R, Kovács A, et al. Numerical simulations of atmospheric dispersion of iodine-131 by different models. *PLoS One.* 2017 [acesso em 2019 ago 24]. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0172312>.
- Crossetti MGO. Revisão integrativa de pesquisa na Enfermagem o rigor científico que lhe é exigido. *Rev. Gaúcha Enferm.* 2012; 33(2):8-9.

16. Katata G, Chino M, Kobayashi T, et al. Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model. *Atmos Chem Phys*. 2015; 15:1029-1070.
17. Wu J-L, Wang Y, Sun W, et al. Atmospheric radionuclides from Fukushima Dai-ichi nuclear accident detected in Lanzhou, China. *Nucl Sci Tech*. 2015; 26:40604.
18. Zhang Z, Ninomiya K, Takahashi N, et al. Daily variation of I-131, Cs-134 and Cs-137 activity concentrations in the atmosphere in Osaka during the early phase after the FDNPP accident. *J Radioanal Nucl Chem*. 2015; 303:1527-1531.
19. Simsek V, Pozzoli L, Unal A, et al. Simulation of ¹³⁷Cs transport and deposition after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident and radiological doses over the Anatolian Peninsula. *Sci Total Environ*. 2014; 74-88.
20. Felsberg A, Ross JO, Schlosser C, et al. Simulating the mesoscale transport of krypton-85. *J Environ Radioact*. 2018; (181):85-93.
21. Silva CM, Tsuruta F, Rodrigues JC, et al. Simulação das Trajetórias de Poluentes em Eventos Naturais e Antropogênicos. *Rev. Virtual Química*. 2018; 10(6):1828-48.
22. An HY, Kang Y-H, Song S-K, et al. Atmospheric Dispersion Characteristics of Radioactive Materials according to the Local Weather and Emission Conditions. *J Radiat Prot Res*. 2016; 41(4):315-327.
23. Chai T, Draxler R, Stein A. Source term estimation using air concentration measurements and a Lagrangian dispersion model - Experiments with pseudo and real cesium-137 observations from the Fukushima nuclear accident. *Atmos Environ*. 2015; (106):241-251.
24. Ramana MV, Nayyar AH, Schoeppner M. Nuclear High-level Waste Tank Explosions: Potential Causes and Impacts of a Hypothetical Accident at India's Kalpakkam Reprocessing Plant. *Sci. Glob. Secur*. 2016; 24(3):174-203.
25. Pirouzmand A, Kowsar Z, Dehghani P. Atmospheric dispersion assessment of radioactive materials during severe accident conditions for Bushehr nuclear power plant using HYSPLIT code. *Prog. Nucl. Energy*. 2018(108):169-178.
26. Vali R, Adelikhah ME, Feghhi SAH, et al. Simulation of radionuclide atmospheric dispersion and dose assessment for inhabitants of Tehran province after a hypothetical accident of the Tehran Research Reactor. *Radiat. Environ Biophys*. 2018.
27. Auxier JP, Auxier JD, Hall HL. Review of current nuclear fallout codes. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017; (171):246-252.
28. Rolph GD, Ngan F, Draxler RR. Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model. *J Environ Radioact*. 2014; (136):41-55.
29. GeYang, Ou W. Dynamic surveillance system for contamination accidents in chemical industry park based on internet of things. In: *Chemical engineering transactions [internet]*. 2018. p. 547-52. [acesso em 2018 dez 16]. Disponível em: www.aidic.it/cet.
30. Prinslow K. Spatial Analysis Of A Bioterrorist Attack On Four Major United States Cities Using An Aerosolized Hemorrhagic Fever Virus [internet]. Fort Hays State University; 2011 [acesso em 2018 abr 23]. Disponível em: <http://scholars.fhsu.edu/theses%0Ahttp://scholars.fhsu.edu/theses/155>.
31. Oke TR. Urban environments. In: Bailey, Oke TR, Rouse WR, organizadores. *The Surface Climates of Canada*, Montréal: McGill-Queen's University Press; 1997. p. 303-327.

Recebido em 29/04/2019

Aprovado em 21/08/2019

Conflito de interesses: inexistente

Suporte financeiro: não houve