



Ministério da Saúde

FIOCRUZ
Fundação Oswaldo Cruz



Adriana Paula Macedo Ferreira Pereira

Liberação acidental de antraz em um laboratório de pesquisa: estudo de caso

Rio de Janeiro

2022

Adriana Paula Macedo Ferreira Pereira

Liberação acidental de antraz em um laboratório de pesquisa: estudo de caso

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente, da Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, na Fundação Oswaldo Cruz, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Simone Cynamon Cohen.

Coorientadora: Prof.^a Dra. Telma Abdalla de Oliveira Cardoso.

Rio de Janeiro

2022

Título do trabalho em inglês: Accidental release of anthrax in a research laboratory: case study.

P4361 Pereira, Adriana Paula Macedo Ferreira.
Liberação acidental de antraz em um laboratório de pesquisa: estudo de caso / Adriana Paula Macedo Ferreira Pereira. -- 2022.
211 f. : il. color.

Orientadora: Simone Cynamon Cohen.
Coorientadora: Telma Abdalla de Oliveira Cardoso.
Tese (Doutorado em Saúde Pública e Meio Ambiente), Rio de Janeiro, 2022.
Bibliografia: f. 175-193.

1. Bacillus anthracis. 2. Gestão de Riscos. 3. Agente Biológico Prejudicial à Saúde. 4. HYSPLIT. 5. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model. I. Título.

CDD 660.6

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Rede de Bibliotecas da Fiocruz com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecário responsável pela elaboração da ficha catalográfica: Cláudia Menezes Freitas - CRB-7-5348
Biblioteca de Saúde Pública

Adriana Paula Macedo Ferreira Pereira

Liberação acidental de antraz em um laboratório de pesquisa: estudo de caso

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente, da Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, na Fundação Oswaldo Cruz, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 25 de julho de 2022.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Corbiniano Silva
Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

Prof. Dr. Marcos Vinicius de Castro e Silva
Defesa Civil do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Marcos Denicio da Silva de Souza
Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca

Prof. Dr. Paulo Rubens Guimarães Barrocas
Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca

Prof.^a Dra. Telma Abdalla de Oliveira Cardoso (Coorientadora)
Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca

Prof.^a Dra. Simone Cynamon Cohen (Orientadora)
Fundação Oswaldo Cruz – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca

Rio de Janeiro

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram de mais esta etapa na minha vida acadêmica e profissional.

Ao meu esposo agradeço o companheirismo e por sempre estar disposto a discutir os assuntos da tese. Ao meu filho por todos os sorrisos. Aos meus pais e parentes por toda força, apoio e carinho.

Às minhas orientadoras Dra. Simone Cynamon Cohen e Dra. Thelma Abdalla Oliveira Cardoso pelos ensinamentos, disponibilidade e atenção.

De forma especial, registro meu agradecimento a Professora Dra. Elaine Alves dos Santos, do Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), pelas horas dedicadas ao meu trabalho e por toda mentoria durante essa caminhada.

Também expresso minha gratidão aos Professores Dr. Corbiniano Silva, Dr. Luiz Cláudio Gomes Pimentel e Dr. Ian Cunha D'Amato Viana Dragaud, do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e ao Dr. Nilton Oliveira Moraes, meteorologista do Centro de Operações Rio, pelo auxílio nas modelagens computacionais de dispersão atmosférica.

A toda a tripulação do Instituto de Pesquisas Biomédicas (IPB) do Hospital Naval Marcílio Dias (HNMD), Marinha do Brasil. Em especial, ao Capitão de Mar e Guerra (Médico) Marcelo Leal Gregório pela permissão para cursar o Doutorado, à MSc. e Capitão-Tenente (Estatística) Giuliana Vasconcelos de Souza Fonseca por todo apoio como minha chefia direta e ao Dr. e Segundo-Sargento (Enfermeiro) Luiz Antonio da Costa Rodrigues por me apresentar o modelo HYSPLIT.

Aos professores do Programa de Doutorado em Saúde Pública e Meio Ambiente da ENSP/FIOCRUZ por todo conhecimento compartilhado.

Aos funcionários da Secretaria Acadêmica (SECA), da Biblioteca e do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da ENSP por toda atenção e auxílio a mim concedido.

RESUMO

A liberação acidental de agentes biológicos em laboratórios de pesquisa pode causar inúmeros impactos para a saúde humana e animal e desequilíbrio dos sistemas ambientais, tornando-se um desafio para os campos da Biossegurança, da Bioproteção e da gestão de eventos químicos, biológicos, radiológicos e nucleares (QBRN). A utilização de estratégias, como a modelagem computacional, pode fortalecer a capacidade de resposta e mitigar possíveis repercussões relacionadas a esse tipo de evento. O objetivo deste estudo foi analisar a utilização do modelo computacional de dispersão atmosférica *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model* (HYSPLIT) como potencial ferramenta de gestão frente a cenários de liberação acidental de *Bacillus anthracis*. Um estudo de caso foi delineado para simular cenários hipotéticos de liberação de esporos de antraz da plataforma de nível de biossegurança 3 situada no Pavilhão Hélio Peggy Pereira, campus da Fundação Oswaldo Cruz, Manguinhos, Rio de Janeiro. As simulações foram executadas pelo modelo HYSPLIT contendo dados meteorológicos oriundos do sistema *Global Forecast System* (GFS) 0,25° e do modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) 1 km. Foi realizada uma comparação qualitativa por meio de análise gráfica e espacial entre as modelagens geradas pelo HYSPLIT-GFS 0,25° e pelo HYSPLIT-WRF 1 km. Também foi executada uma comparação quantitativa baseada em índices estatísticos e dados observacionais de 3 estações meteorológicas próximas ao local de estudo. A maioria das trajetórias das massas aéreas ultrapassou o raio de 50 km de extensão, o que excede todas as estimativas de áreas de predição estabelecidas para um evento envolvendo a liberação de agentes biológicos. Todas as simulações da dispersão de antraz revelaram que as concentrações com maior carga infectante ficaram restritas apenas as proximidades do local de liberação, num raio menor que 1 km. O HYSPLIT-WRF 1 km apresentou melhor destreza tanto em considerar aspectos do relevo, quanto em relação a análise estatística perante os dados observados nas estações meteorológicas. A partir desses resultados foram elencadas potencialidades, limitações e alguns aspectos relativos à experiência do usuário, assim como foi elaborada uma matriz de análise a fim de demonstrar como o modelo pode colaborar frente ao contexto analisado. Espera-se que o modelo HYSPLIT possa ser incorporado a práxis de diversas instituições e atores envolvidos nas análises de riscos biológicos em ambientes laboratoriais e na gestão de eventos QBRN.

Palavras-chave: *Bacillus anthracis*; gestão de riscos; agente biológico prejudicial à saúde; HYSPLIT; *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*.

ABSTRACT

The accidental release of biological agents in research laboratories may cause numerous impacts on human and animal health and imbalance of environmental systems, becoming a challenge for the fields of Biosafety, Biosecurity and the management of chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) events. The use of strategies, such as computational modeling, can strengthen the response capacity and mitigate possible repercussions related to this type of event. The aim of this study was to analyze the computational model of atmospheric dispersion Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) usage as a potential management tool facing scenarios of accidental release of *Bacillus anthracis*. A case study was designed to simulate hypothetical release of anthrax spores scenarios in the biosafety level 3 platform located at Pavilhão Hélio Peggy Pereira, campus of Fundação Oswaldo Cruz, Manguinhos, Rio de Janeiro. The simulations were performed using the HYSPLIT model containing meteorological data from the Global Forecast System (GFS) 0.25° and the Weather Research and Forecasting Model (WRF) 1 km. A qualitative comparison was carried out through graphical and spatial analysis between the models generated by the HYSPLIT-GFS 0.25° and by the HYSPLIT-WRF 1 km. A quantitative comparison based on statistical indices and observational data from 3 meteorological stations near to the study site was also performed. Most air mass trajectories surpassed a radius of 50 km in length, which exceeds all prediction area estimates established for an event involving the release of biological agents. All anthrax dispersal simulations revealed that the concentrations with the highest infective load were restricted to the vicinity of the release site, within a radius of less than 1 km. The HYSPLIT-WRF 1 km showed better dexterity as much in considering aspects of the relief as to the statistical analysis of the data observed in the meteorological stations. Based on these results, potentialities, limitations and some aspects related to the user experience were listed, as well as an analysis matrix was elaborated in order to demonstrate how the model can collaborate in the context analyzed. It is hoped that the HYSPLIT model can be incorporated into the practice of several institutions and actors involved in the analysis of biological risks in laboratory environments and in the management of CBRN events.

Keywords: *Bacillus anthracis*; risk management; biological agent harmful to health; HYSPLIT; Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Ciclo da gestão de eventos químicos, biológicos, radiológicos e nucleares.....	50
Figura 2 -	Comparação de áreas e cobertura entre armas químicas, biológicas, radiológicas e nucleares.....	54
Figura 3 -	Predição simplificada para eventos de liberação de agentes biológicos.....	55
Figura 4 -	Predição detalhada de eventos envolvendo a liberação de agentes biológicos.....	56
Figura 5 -	Camadas da atmosfera terrestre.....	62
Figura 6 -	Classificação por tamanho e composição do material particulado atmosférico em relação à sua fonte.....	63
Figura 7 -	Formas de deposição de partículas atmosféricas, de acordo com o tamanho e tempo de residência.....	64
Figura 8 -	Camada limite atmosférica.....	65
Figura 9 -	Caracterização dos estudos incluídos na pesquisa.....	83
Figura 10 -	Fluxograma do <i>Sistema de Modelagem Weather Research and Forecast (WRF)</i>	97
Figura 11 -	Localização da área de estudo – Plataforma Nível de Biossegurança 3 do Instituto Oswaldo Cruz, Pavilhão Hélio Peggy Pereira (HPP), Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	100
Figura 12 -	Predominância de direção e intensidade dos ventos por estação e período do dia, de 2002 a 2021, da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.....	103
Figura 13 -	Dados meteorológicos do Aeroporto do Galeão, Rio de Janeiro, Brasil, em 2021.....	110
Figura 14 -	Dados meteorológicos do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro, Brasil, em 2021.....	111
Figura 15 -	Fluxograma da estratégia metodológica utilizada nas modelagens computacionais da dispersão acidental do antraz.....	114

Figura 16 -	Trajétórias das massas aéreas, com direção <i>forward</i> , executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) 3-9 h; (b) 9-15 h; (c) 15-21 h; (d) 21-03h...	118
Figura 17 -	Trajétórias das massas aéreas, com direção <i>forward</i> , executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) 3-9 h; (b) 9-15 h; (c) 15-21 h; (d) 21-03h.....	119
Figura 18 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	121
Figura 19 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	122
Figura 20 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	123
Figura 21 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	124
Figura 22 -	Trajétórias das massas aéreas, com direção <i>forward</i> , executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no <i>Google Earth</i>	127
Figura 23 -	Trajétórias das massas aéreas, com direção <i>forward</i> , executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no <i>Google Earth</i>	128

Figura 24 -	Trajетórias das massas aéreas, com direção <i>forward</i> , executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no <i>Google Earth</i>	129
Figura 25 -	Trajетórias das massas aéreas, com direção <i>forward</i> , executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no <i>Google Earth</i>	130
Figura 26 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	134
Figura 27 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	135
Figura 28 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	136
Figura 29 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	137

Figura 30 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	138
Figura 31 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	139
Figura 32 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	140
Figura 33 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	141
Figura 34 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	142
Figura 35 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	143

Figura 36 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	144
Figura 37 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	145
Figura 38 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	146
Figura 39 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	147
Figura 40 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	148
Figura 41 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	149

Figura 42 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	150
Figura 43 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	151
Figura 44 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	152
Figura 45 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	153
Figura 46 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	154
Figura 47 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	155

Figura 48 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	156
Figura 49 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.....	157
Figura 50 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.....	158
Figura 51 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.....	159
Figura 52 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.....	160
Figura 53 -	Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.....	161
Figura 54 -	Fluxograma da seleção dos estudos da primeira revisão integrativa da literatura.....	210
Figura 55 -	Fluxograma da seleção dos estudos da segunda revisão integrativa da literatura.....	211

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Principais eventos envolvendo a exposição de agentes biológicos de alto risco.....	30
Quadro 2 -	Principais leis e demais normas relacionadas à Biossegurança no Brasil.....	37
Quadro 3 -	Matriz de classificação do risco em função do potencial de risco à saúde em relação ao potencial de contenção dos riscos associados ao agente biológico.....	41
Quadro 4 -	Características das classes de risco (1 a 4) dos agentes biológicos em relação ao risco individual, coletivo e das condições terapêuticas.....	41
Quadro 5 -	Principais requisitos exigidos em relação aos níveis de Biossegurança (NB).....	44
Quadro 6 -	Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.....	75
Quadro 7 -	Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.....	86
Quadro 8 -	Configurações adotadas no uso do modelo HYSPLIT dos estudos incluídos na pesquisa.....	91
Quadro 9 -	Matriz de análise da contribuição do modelo HYSPLIT em relação as principais tarefas de cada etapa da gestão de eventos acidentais envolvendo antraz.....	170
Quadro 10 -	Elementos para a busca e seleção dos artigos para a elaboração das revisões de literatura.....	209

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Precipitação total mensal (mm) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.....	104
Tabela 2 -	Quantidade de dias de chuva (dias) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.....	105
Tabela 3 -	Média mensal de temperatura (°C) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.....	106
Tabela 4 -	Umidade relativa média (%) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.....	107
Tabela 5 -	Comparação do posicionamento espacial e da pressão atmosférica entre as trajetórias, na direção <i>forward</i> , executadas com os dados meteorológicos oriundos do HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS) <i>versus</i> HYSPLIT-WRF 1km (WRF), referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	131
Tabela 6 -	Dados meteorológicos oriundos do HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS), do HYSPLIT-WRF 1 km (WRF), da Estação Automática de São Cristóvão (EASC), do Aeroporto Galeão (SBGL) e do Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	163
Tabela 7 -	Comparação estatística dos índices de correlação (COR), do erro quadrático médio normalizado (EQMN), do erro absoluto médio (EAM), do erro médio (BIAS), do desvio fracional (Fb) e desvio fracional padrão (Fs) entre os dados simulados pelo HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS) e HYSPLIT-WRF 1 km (WRF) e os dados observados na Estação Automática de São Cristóvão (EASC), no Aeroporto Galeão (SBGL) e no Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.....	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABP	Aerossóis Biológicos Primários
ABIN	Agência Brasileira de Inteligência
ADM	Armas de Destruição em Massa
ADMS	Atmospheric Dispersion Modelling System
AERMOD	American Meteorological Society/United States Environmental Protection Agency Regulatory Model
AFWA	Air Force Weather Agency
AGL	Above Ground Level
ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres
AMP	Adenosina Monofosfato
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AP	Antígeno Protetor
BIAS	Erro médio
BPL	Boas Práticas de Laboratório
CALPUFF	Californian Puff Model
CBS	Comissão de Biossegurança em Saúde
CDB	Convenção sobre a Diversidade Biológica
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
CEP	Comitê de Ética em Pesquisas com Seres Humanos
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLN	Camada Limite Noturna
CLP	Camada Limite Planetária
CLS	Camada Limite Superficial
CM	Camada de Mistura
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNS	Conselho Nacional de Saúde
COAMPS	Coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System
COR	Coefficiente de Correlação
COVID-19	Doença por Coronavírus 19
CR	Camada Residual
CSB	Cabine de Segurança Biológica

CTNBio	Comissão Técnica Nacional de Biossegurança
DECS	Descritores em Ciências da Saúde
Delfic	Defense Land Fallout Interpretative Code
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EAM	Erro Absoluto Médio
END	Estratégia Nacional de Defesa
ENSP	Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EQMN	Erro Quadrático Médio Normalizado
EUA	Estados Unidos da América
FA	Forças Armadas
FAA	Federal Aviation Administration
Fb	Desvio Fracional
<i>FDC</i>	Fallout Dispersion Code
FE	Fator de Edema
FIOCRUZ	Fundação Oswaldo Cruz
FNL	Final Analysis
FL	Fator Letal
Fs	Desvio Fracional Padrão
FSL	Forecast Systems Laboratory
FTP	File Transfer Protocol
GDAS	Global Data Assimilation System
GFS	Global Forecast System
HPAC	Hazard Prediction and Assessment Capability
HRRR	High-Resolution Rapid Refresh
HTML	Hyper Text Markup Language
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
ICT/UFF	Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense
IAEA	International Atomic Energy Agency
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEP	Institute for Economics and Peace

IGT	Índice Global de Terrorismo
IME	Instituto Militar de Engenharia do Exército
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INI	Instituto Nacional de Infectologia Evandro Chagas
IOC	Instituto Oswaldo Cruz
LVRS	Laboratório de Vírus Respiratório e do Sarampo
MATLAB	Matrix Laboratory
MeSH	Medical Subject Headings
METAR	Meteorological Aerodrome Report
MLDP0	Zeroth Order Lagrangian Dispersion Model
MM5	Mesoscale Model version 5
MMM	Mesoscale and Microscale Meteorology
MP	Material Particulado
MS	Ministério da Saúde
NAM	North American Mesoscale Model
NAME	Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NNRP	Environmental National Centers for /National Center for Atmospheric Research Reanalysis Project
Noah-MP	Noah-Multiparameterization Land Surface Model
NRL	Naval Research Laboratory
NWS	National Weather Service
OGM	Organismos Geneticamente Modificados
OMS	Organização Mundial de Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
PNB	Programa Nuclear Brasileiro
PNM	Programa Nuclear da Marinha
PROSUB	Programa de Desenvolvimento de Submarinos
QBRN	Químico, Biológico, Radiológico e Nuclear
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
READY	Real-time Environmental Applications and Display sYstem
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

RIMPUFF	Risø Mesoscale PUFF Model
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RNA	Ácido Ribonucleico
RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models
SBGL	Aeroporto do Galeão
SBRJ	Aeroporto Santos Dumont
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIPRON	Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SOPT	Sistema de Observação e Prospectiva Tecnológica
SVG	Scalable Vector Graphics
START	Simple Triage And Rapid Treatment
STEM	Spatio-Temporal Epidemiological Modeler
UE	União Europeia
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WRF-ARW	Weather Research and Forecasting Model - Advanced Research WRF
WSM6	WRF Single-moment 6-class Scheme
YSU	Yonsei University

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	28
2.1	LIBERAÇÃO ACIDENTAL DE AGENTES BIOLÓGICOS.....	28
2.1.1	Histórico.....	29
2.1.2	Biossegurança.....	35
2.1.2.1	Análise de Risco Biológico.....	40
2.1.2.1.1	<i>Avaliação do Risco.....</i>	<i>40</i>
2.1.2.1.2	<i>Gerenciamento do Risco.....</i>	<i>42</i>
2.1.2.1.3	<i>Comunicação de Risco.....</i>	<i>45</i>
2.1.3	Bioproteção.....	46
2.1.4	Gestão de eventos QBRN.....	49
2.2	<i>BACILLUS ANTHRACIS E O ANTRAZ.....</i>	<i>57</i>
2.2.1	Etiologia.....	58
2.2.2	Epidemiologia.....	59
2.2.3	Fisiopatologia.....	59
2.2.4	Diagnóstico e Tratamento.....	61
2.3	DISPERSÃO ATMOSFÉRICA.....	62
2.3.1	Principais aspectos.....	62
2.3.2	Aerobiologia.....	66
2.3.3	Modelos computacionais de dispersão atmosférica e simulação de cenários.....	69
2.3.3.1	Modelo HYSPLIT.....	71
2.3.3.1.1	<i>HYSPLIT e a Gestão de Eventos QBRN.....</i>	<i>74</i>
2.3.3.1.2	<i>HYSPLIT e a dispersão de agentes biológicos em áreas urbanas.....</i>	<i>85</i>
2.3.3.2	Modelo WRF.....	96
3	OBJETIVOS.....	98
3.1	OBJETIVO GERAL.....	98
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	98
4	METODOLOGIA.....	99
4.1	TIPO DE PESQUISA.....	99

4.2	UNIVERSO DA PESQUISA: PLATAFORMA NB3 DO IOC, CAMPUS FIOCRUZ/MANGUINHOS).....	99
4.2.1	Condições meteorológicas da Área de Estudo.....	101
4.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS.....	112
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	116
5.1	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS CARACTERIZANDO A LIBERAÇÃO ACIDENTAL DE ANTRAZ NA PLATAFORMA NB3 DO IOC, CAMPUS FIOCRUZ/MANGUINHOS.....	117
5.2	COMPARAÇÃO MODELAGEM HYSPLIT-GFS 0,25° <i>VERSUS</i> HYSPLIT-WRF 1 KM.....	125
5.3	POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO MODELO HYSPLIT.....	165
5.4	CONTRIBUIÇÕES DO MODELO HYSPLIT NA GESTÃO DE EVENTOS ENVOLVENDO A LIBERAÇÃO ACIDENTAL DE <i>BACILLUS ANTHRACIS</i>	169
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	173
	REFERÊNCIAS.....	175
	APÊNDICE I – ARTIGO “GESTÃO DE EVENTOS QBRN E A UTILIZAÇÃO DO MODELO HYSPLIT: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DE LITERATURA”.....	194
	APÊNDICE II – METOLOGIA DAS REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS INTEGRATIVAS.....	208

1 INTRODUÇÃO

O século XX foi marcado por um profundo estreitamento da relação entre ciência e técnica, o que favoreceu mudanças sociais, políticas, econômicas e sanitárias significativas. As descobertas da ciência da microbiologia, seguida pela revolução biotecnológica e pelos recentes avanços do campo da nanotecnologia, o aprimoramento da manipulação de microrganismos patogênicos, o aprofundamento das técnicas de engenharia genética e de biologia sintética possibilitaram a compreensão de distintas patologias e o delineamento de estratégias de tratamento e cura. Por outro lado, esse progresso aflora preocupações e desafios para os campos da Ciência e Tecnologia, da Saúde Pública, bem como para o âmbito da Defesa (GÓMEZ-TATAY; HERNÁNDEZ-ANDREU, 2019; RYAN, 2016).

A liberação acidental ou intencional de agentes biológicos manipulados geneticamente ou não, bem como, a possibilidade de “criação” de um novo organismo pode causar inúmeros impactos para a saúde humana e animal, além de provocar desequilíbrio dos sistemas ambientais. Desta forma, os riscos biológicos têm sido gradativamente encarados como um desafio à segurança nacional e internacional, assim como à Biossegurança e a Bioproteção, que tornaram-se temas e campos de pesquisa na agenda global (HE, 2021).

Cabe ressaltar que a Biossegurança e a Bioproteção não se limitam à dimensão técnica, mas sobretudo a importantes dimensões de ordem política, econômica, sanitária, qualidade, segurança, normativa, regulatória, educativa, entre outras. São considerados temas complexos, transdisciplinares e complementares, fundamentais para que as atividades envolvendo agentes biológicos de risco e seus derivados possam ser desenvolvidas com a necessária segurança, sem causar danos à saúde humana, animal, vegetal e ao meio ambiente (BRASIL, 2019).

Historicamente os registros demonstram que acidentes ocorridos em ambientes laboratoriais ocorreram durante a manipulação das amostras ou dos animais de laboratório, no transporte entre laboratórios no mesmo local ou em prédios distintos, falhas nos sistemas de infraestrutura, acidentes naturais (terremotos, tsunamis), incêndios, falhas no processo de identificação e guarda de amostras (MANHEIM; LEWIS, 2022).

Em sua maioria, os acidentes envolveram apenas o ambiente laboratorial, mas em alguns casos eles extrapolaram esses espaços e expuseram o ambiente externo a diversos riscos, como por exemplo: (a) em 1979, na Rússia, onde uma falha de comunicação sobre a retirada de um filtro para manutenção acarretou na liberação de esporos de antraz para o entorno do instituto de pesquisa e matou 66 pessoas; e (b) em 2007, no Reino Unido, onde vazamentos na tubulação

de dois laboratórios causaram um surto de febre aftosa (MANHEIM; LEWIS, 2022).

Durante o cenário pandêmico da doença por coronavírus 2019 (COVID-19) ressurgiu a discussão sobre a possibilidade desses eventos estarem relacionados ao escape de patógenos para a população humana devido a uma violação da Biossegurança ou Bioproteção em um laboratório ou durante as atividades de campo, o que endossa a importância da análise de riscos em laboratórios e centros de pesquisas (SAGO, 2022).

No Brasil não existem registros de acidentes envolvendo a liberação de agentes biológicos que tenham causado contaminação em massa dos profissionais de uma determinada instituição ou extrapolado o ambiente laboratorial. Porém é reconhecido que o país possui diversas fragilidades relacionadas a Biossegurança e Bioproteção em laboratórios e centros de pesquisa. Também é preponderante entre a comunidade científica e diversos segmentos da sociedade que o país necessita de um plano de investimentos em infraestrutura de pesquisa que amplie a capacidade instalada e impeça a obsolescência (DE NEGRI; GALDINO, 2021).

A realização de eventos de grande dimensão e de visibilidade mundial, como os Jogos Mundiais Militares (2011), a Jornada Mundial da Juventude (2013), a Copa do Mundo da FIFA (2014) e as Olimpíadas e Paraolimpíadas (2016), propicia um risco aumentado, pois são alvos potenciais, capazes de fortalecer os interesses de criminosos à produção de atentados terroristas utilizando agentes químicos, biológicos, radiológicos e nucleares (QBRN) (FORTES, 2012). Nesse contexto, diversas instâncias governamentais e privadas tiveram que rever suas leis, atos, normas e planos estratégicos, aprimorar práticas, capacitar profissionais e adquirir novos meios operativos e tecnologias, algumas dessas ações foram executadas como contrapartida legal dos órgãos organizadores externos desses eventos. A partir dessa época ocorreram importantes avanços na gestão de eventos QBRN e sua instituição como política pública devendo atuar em consonância com a Biossegurança e a Bioproteção.

Esse movimento possibilitou a atuação frente à diversas vulnerabilidades, tal como a reconhecimento de potencialidades no território nacional e o avanço em marcos legais e normas técnicas, como por exemplo: (a) o Decreto nº 7.538/2011 (BRASIL, 2011), que criou a Secretaria Extraordinária de Segurança para Grandes Eventos com a finalidade de coordenar a segurança conjunta para a realização dos grandes eventos; (b) a implementação dos sistemas de defesa das Forças Armadas, como a criação do Batalhão de Defesa QBRN do Exército (COMANDO DE OPERAÇÕES TERRESTRES, 2016), do Centro de Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica da Marinha do Brasil (COMANDO-GERAL DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS, 2018) e da implantação do Centro de Tratamento de Vítimas por Acidentes Químicos, Biológicos, Radiológicos e Nucleares da Aeronáutica (BRASIL, 2015);

(c) a Portaria Normativa Nº 585/2013 (BRASIL, 2013), que aprova as diretrizes de Biossegurança, Bioproteção e Defesa Biológica do Ministério da Defesa; (d) a Lei Antiterrorismo (BRASIL, 2016), sancionada em 2016, que trata da tipificação, julgamento e punição para crimes de natureza terrorista no território nacional; (e) a Portaria Nº 53/2018 (BRASIL, 2018) que constitui, no âmbito da Câmara de Relações Exteriores e Defesa Nacional do Conselho de Governo, um Grupo de Trabalho de Biossegurança e Bioproteção com as finalidades de propor a Política Nacional de Biossegurança e Bioproteção; acompanhar, estudar, avaliar, articular e propor ações e medidas de Biossegurança e Bioproteção; e elaborar trabalhos relacionados às infraestruturas críticas desta área; (f) o Plano de Contingência para Emergências em Saúde Pública por Agentes Químico, Biológico, Radiológico e Nuclear, no âmbito do Ministério da Saúde (MS) (MS, 2014).

Sparta (2022) ao analisar o arcabouço jurídico da defesa QBRN brasileira identificou a existência de tratados, leis, decretos, portarias intermitentes, incompletos e com pouca abrangência para um cenário completo de ameaças QBRN. A autora afirma que a legislação é formulada, direcionada e conduzida para um determinado ente governamental, o que acarreta num cenário de pouca governança.

Outrossim, o MS ainda aponta diversas vulnerabilidades de Biossegurança e Bioproteção no país, tais como: falta de mapeamento dos agentes biológicos selecionados, em custódia no território nacional, em decorrência também da ausência de notificação compulsória de trabalho com agentes biológicos de alto risco; inexistência de uma política ampla de Biossegurança e Bioproteção; ausência de sistemas de prevenção e resposta; bem como a baixa taxa de notificação e investigação de acidentes laboratoriais (BRASIL, 2019).

Segundo essa mesma publicação promover a Biossegurança e a Bioproteção em saúde: *“...não apenas contribui para o aprimoramento técnico na área, mas, sobretudo, reforça o propósito de prevenção de agravos e promoção da saúde que são princípios fundamentais do Sistema Único de Saúde”* (BRASIL, 2019, p. 15).

Desta forma, conhecer a conjuntura dos riscos e refletir sobre os possíveis cenários, buscando contemplar ações preventivas, repressivas e corretivas, deve ser o cerne da lógica do planejamento estratégico e operacional de um esforço conjunto e contínuo de diversas instituições nos níveis federal, estadual e municipal e até mesmo a nível internacional (NEVES, 2016).

A pandemia de COVID-19 no Brasil ratificou a necessidade de aumentar os investimentos em pesquisa, que garantam o avanço tecnológico, inteligência e soberania do país, bem como a capacidade de estudar patógenos de alto risco, de prospectar, desenvolver e

testar novos medicamentos, insumos, vacinas e kits diagnósticos (CGEE, 2021).

Em 2020 foi criado um grupo de trabalho para elaboração de proposta de construção de um Laboratório Nacional de Máxima Contenção Biológica. Esse grupo organizou um Seminário Internacional sobre o tema, que contou com a presença de profissionais e autoridades internacionais com larga experiência na área. Durante o evento foram apresentados os desafios no planejamento, na construção e na operação desse tipo de laboratório, pois tratar-se “...*de um projeto estratégico complexo, que demanda tempo, investimentos a longo prazo e planejamento (técnico, científico, ambiental e estrutural, dentre outros) consistente para o sucesso da sua execução*” (CGEE, 2021, p. 8).

Para alcançar tais demandas, tanto a gestão Biossegurança e a Bioproteção, quanto a gestão de eventos QBRN, devem ser capazes de lidar com essa complexidade, propiciar a produção de conhecimento científico e tecnológico, provisionar recursos, infraestrutura, equipamentos e insumos, além de promover espaços de articulação e capacitação entre diversos entes, das esferas pública-privada e cidadãos (FORTES, 2012).

Elas necessitam ser concebidas à luz de diversos campos científicos e quanto aos riscos biológicos, uma das áreas que se destaca é a microbiologia humana e ambiental, pois tem como objeto de estudo conhecer as características morfo genéticas, a viabilidade, a reprodução, a patogenicidade dos microrganismos existentes em diversas matrizes e seus potenciais impactos à saúde e meio ambiente (DELORT; AMATO, 2018).

No contexto deste trabalho, outras áreas correlatas, como a Aerobiologia e as Ciências Atmosféricas, auxiliam a entender os fenômenos químicos, físicos e biológicos que estão relacionados à dispersão atmosférica dessas ameaças biológicas. Essas biopartículas compõem os denominados bioaerossóis, considerados como um conjunto de partículas atmosféricas liberadas diretamente da biosfera (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016).

Diversos estudos comprovaram que os bioaerossóis são facilmente transferidos de um ambiente para outro, devido ao seu pequeno tamanho e peso (DUVAL *et al.*, 2022; SEOK; LEE; KIM, 2021; BULFONE *et al.*, 2021; PRATHER *et al.*, 2020; SANTOS; VALERIANO; SILVA, 2018; VAN LEUKEN *et al.*, 2016; JAMOLIN *et al.*, 2013; PRINSLOW, 2011). Há evidências que eles podem ser dispersos em escalas regionais, continentais e até mesmo globais, permanecendo longos períodos na atmosfera. Porém, mesmo que haja avanço no entendimento destes aspectos, a análise do comportamento de alguns tipos de bioaerossóis exigem protocolos robustos de amostragem e análise (YOO *et al.*, 2017). Além disso, (DELORT; AMATO, 2018) expõem que ainda não há uma abordagem padrão disponível.

Com a ampliação da capacidade de compreensão da relação das emissões de patógenos,

da suscetibilidade dos hospedeiros e dos processos atmosféricos complexos pode-se avançar na avaliação e na redução dos riscos de infecção por ameaças biológicas transmitidas por via aérea. Uma das ferramentas que tem se mostrado útil para descrever a dispersão de bioaerossóis são os modelos computacionais de dispersão atmosférica. Eles conseguem modelar esses fenômenos em diferentes escalas e resoluções espaciais e temporais, bem como prever o transporte, a dispersão e deposição de distintos gases e partículas (LEELŐSSY *et al.*, 2014).

A modelagem detalhada dos riscos biológicos com uma abordagem sistêmica antes, durante (quando viável) e após incidentes ou em exercícios específicos pode mitigar os impactos de uma possível liberação de um agente patológico. O planejamento para respostas médicas e de saúde pública otimizadas é considerado como extremamente complexo, mas para entender e gerenciar melhor essa complexidade, os modelos computacionais que analisam um ou vários aspectos de cada tipo de incidente podem projetar números, locais, tipos e gravidade de lesões específicas ao longo do tempo para que a gestão desse tipo de evento possa ser otimizado com antecedência e/ou em tempo real (COLEMAN *et al.*, 2019).

A modelagem pode ajudar a projetar por que, onde e como modificar melhor as prioridades de triagem de rotina em condições iniciais de austeridade e como otimizar as funções da equipe e priorizar recursos escassos usando protocolos éticos e eficazes. A modelagem também auxiliar a identificar problemas de longo prazo que precisam ser considerados. O planejamento para esses cenários hipotéticos permite que a resposta seja mais facilmente personalizada para incidentes do mundo real (COLEMAN *et al.*, 2019).

Nessa conjuntura, a ciência da simulação tem se destacado por possibilitar a criação ou a reprodução de diversos fenômenos, sejam eles naturais ou originados pela ação do homem (ARMSTRONG, 2017). Uma das metodologias mais adotadas é o uso de códigos capazes de simular cenários a partir de modelos computacionais de dispersão aérea. Esses modelos viabilizam a avaliação espacial e temporal da dispersão de diversos tipos de substâncias, como poluentes químicos, radionuclídeos e material particulado, como poeira e bioaerossóis (VISSCHER, 2014).

Algumas destas modelagens conseguem adotar tipos de modelos com distintas propriedades, associar bancos de dados meteorológicos e traçar trajetórias que podem determinar a origem das massas de ar ou descrever processos de transporte de partículas na atmosfera (VAN LEUKEN *et al.*, 2016).

Um dos modelos computacionais de dispersão atmosférica mais adotados pelas Ciências Atmosféricas e pela própria Aerobiologia é o *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model* (HYSPLIT). Esse modelo foi desenvolvido pelo *National Oceanic and*

Atmospheric Administration (NOAA) no início da década de 80 e recebe constantes atualizações e aprimoramentos. Ele adota as abordagens de modelagem lagrangeana, euleriana, além dos modelos de *puff* e de partículas, demonstrando as capacidades de calcular trajetórias de parcelas aéreas e deposição ou dispersão de diversas partículas atmosféricas (NOAA, 2022, 2021, 2019; DRAXLER; HESS, 2020).

O HYSPLIT possui a possibilidade de utilização em uma versão baseada na *internet*, no modo cliente-servidor no *site* da NOAA, denominada *Real-time Environmental Applications and Display sYstem* (READY) e em uma versão instalada no computador compatível com distintos sistemas operacionais. Ambas as versões possuem uma interface gráfica de usuário (GUI) de simples utilização e são gratuitas.

Diversos trabalhos utilizaram o HYSPLIT para evidenciar possíveis aportes de massas aéreas ou a dispersão de diversos materiais bióticos e abióticos em áreas urbanas e/ou rurais, nos polos do planeta, em áreas desérticas e ambientes marinhos adotando distintas escalas atmosféricas (SANTOS; VALERIANO; SILVA, 2018; VAN LEUKEN *et al.*, 2016). Além disso, este modelo possui reconhecida propriedade na gestão de eventos QBRN, sendo capaz de gerar evidências que contribuam no planejamento, na preparação, na resposta e na recuperação de territórios impactados por acidentes e incidentes, independentemente do porte do evento (PEREIRA *et al.*, 2019; SILVA, 2013).

Conforme afirmado acima o HYSPLIT é reconhecido pela comunidade científica como uma ferramenta capaz de contribuir para a gestão de eventos QBRN, mas durante a elaboração desta tese não foi encontrado nenhum material científico que utilizou essa ferramenta para modelar casos de liberação acidental de agentes biológicos. Esses achados legitimam a necessidade de aprofundar o tema, no intuito de ampliar o conhecimento teórico, prático e estratégico e fazem emergir a pergunta do presente estudo: “O modelo HYSPLIT pode ser uma potencial ferramenta de gestão frente a cenários de liberação acidental de antraz?”.

O *Bacillus anthracis*, popularmente denominado com o mesmo nome da doença que ele causa – o antraz, foi adotado como agente biológico a ser analisado nesta tese, pois pesquisadores do Laboratório de Referência Nacional para Carbúnculo e do Laboratório de Fisiologia Bacteriana da FIOCRUZ manipulam amostras contendo essa bactéria, embora trabalhem em sua maioria com células vegetativas que não são infectantes por inalação. Além disso, o antraz é uma bactéria que possui persistência ambiental, podendo em algumas condições naturais ser encontrado depois de décadas e alguns estudos também relatam que ele pode se replicar no solo (CARLSON *et al.*, 2018).

O estudo de caso simulou cenários hipotéticos de liberação de esporos de antraz da

plataforma de nível de biossegurança 3 (NB3) situada no Pavilhão Hélio Peggy Pereira (HPP), localizado no campus da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ), no bairro de Manguinhos, na capital do Estado do Rio de Janeiro.

A tese foi estruturada da seguinte forma: (1) revisão da literatura que apresenta o histórico de liberações acidentais de agentes biológicos, como a gestão do risco e as contribuições dos campos da biossegurança e da bioproteção são estratégias capazes de promover ambientes seguros, como a gestão de eventos QBRN, algumas características do antraz e como modelos de dispersão atmosférica, com destaque para o modelo HYSPLIT, podem auxiliar no contexto estudado; (2) objetivo proposto pela tese; (3) metodologia adotada; (4) resultados e discussão; (5) conclusões e perspectivas futuras.

Espera-se que o modelo HYSPLIT possa auxiliar no delineamento de estratégias de atuação dos diversos atores e instituições envolvidos nas análises de riscos biológicos em ambientes laboratoriais e na gestão de eventos QBRN do país.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 LIBERAÇÃO ACIDENTAL DE AGENTES BIOLÓGICOS

Ambientes laboratoriais são locais que expõem as pessoas que nele trabalham ou circulam, ou até mesmo sua vizinhança, a riscos de diversas origens. Os acidentes e incidentes ocorrem regularmente nesses locais e geralmente resultam de uma sucessão de falhas (MÉNARD; TRANT, 2020).

Em termos conceituais os incidentes são definidos como um:

“(...) evento não planejado que não resulta em danos pessoais, mas pode resultar em danos à propriedade ou é digno de registro”, já os acidentes são considerados como um tipo de “evento não planejado que resulta em ferimentos pessoais ou danos materiais” (GOPALASWAMI; HAN, 2020, p. 2).

Ménard e Trant (2020) elencaram alguns fatores contribuintes para a ocorrência desses eventos: (a) riscos associados aos materiais ou aos equipamentos usados; (b) riscos relacionados às habilidades e conhecimento da equipe; (c) características ou qualidades da chefia; (d) infraestrutura do laboratório; (e) riscos relacionados às características institucionais. Adicionalmente, fatores naturais (terremotos e inundações) também podem desencadear a ocorrência de acidentes (MANHEIM; LEWIS, 2022).

De uma forma geral, os acidentes mais comuns são os relacionados com vazamentos químicos, choques, pequenos incêndios, quebra de vidraria, explosão de produtos químicos incompatíveis (GOPALASWAMI; HAN, 2020). Em serviços de saúde, tais como clínicas e hospitais, e em laboratórios de ensino-pesquisa, os acidentes mais recorrentes estão relacionados a exposição a fluidos biológicos dos pacientes, lesões com materiais perfurocortantes, transporte de amostras e mordidas ou arranhões dos animais de experimentação (DE SOUZA; DE ALMEIDA, 2020; MANHEIM; LEWIS, 2022; STEFANATI *et al.*, 2017; BASSO *et al.*, 2016; SALGADO *et al.*, 2016).

Manheim e Lewis (2022) catalogaram a ocorrência de distintos acidentes envolvendo a liberação de agentes biológicos de alto risco e demonstram que esses tipos de eventos, embora considerados raros, são mais frequentes do que se é imaginado. Eles apresentaram que a incidência desses fatos está mais relacionada à ataques biológicos e/ou ao desenvolvimento de programas de armas biológicas ou à realização de pesquisas científicas.

Durante a atual pandemia do COVID-19 e em epidemias passadas há uma discussão sobre

a possibilidade de novos patógenos escaparem para a população humana devido a violações de normas e procedimentos de biossegurança ou de bioproteção em um laboratório ou durante as atividades de campo (SAGO, 2022; KNIGHT, 2021; BLOOM *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2021; WADMAN; COHEN, 2020).

A seguir será apresentado um panorama histórico dos principais acidentes envolvendo a liberação acidental de agentes biológicos e suas respectivas consequências.

2.1.1 Histórico

Eventos envolvendo agentes biológicos datam desde antes da era comum, porém a maioria estava relacionada a disputas territoriais, políticas, sociais, culturais e religiosas. Foi a partir da Primeira Guerra Mundial que o uso intencional malicioso de agentes biológicos ganhou a conotação de arma de destruição em massa (ADM) (RYAN, 2016; JANSEN *et al.*, 2014).

A comunidade internacional ratificou, ao longo dos anos, diversos dispositivos legais que propunham acordos de proibição de desenvolvimento, produção, armazenamento e uso de tais armas. Dentre estes pactos, pode-se mencionar: o Protocolo da Primeira Convenção de Genebra, de 1925, com objetivo de reger sobre a proibição de uso da biologia em guerras; e a Convenção de Proibição de Armas Biológicas e Toxinas, em vigor desde 1975, de âmbito mundial, a qual o Brasil é signatário. Esta Convenção tem vínculo direto com o Regulamento de Saúde Internacional (RSI), cujo objetivo é controlar com eficácia e eficiência os surtos epidêmicos para se alcançar uma proteção máxima nas nações (ALMEIDA, 2015; DUARTE-DAVIDSON *et al.*, 2014; PETRUCCELLI, 2014).

Apesar da existência desses mecanismos legais, o cenário ainda se mantém complexo. Alguns países não abandonaram o desenvolvimento de pesquisas puramente alinhadas ao campo da Biodefesa¹ e há o risco envolvido em investigações científicas relacionadas as doenças emergentes ou reemergentes (MANHEIM; LEWIS, 2022). Há também apreensão frente ao vertiginoso avanço técnico-científico ocorrido nas últimas décadas, principalmente os da biologia sintética, área que busca a criação de produtos fundamentalmente novos, como peças biológicas ou sistemas não encontrados na natureza, inclusive produzir *design* e fabricação mais fáceis e mais rápidos do que os OGM produzidos pela técnicas mais tradicionais (GÓMEZ-TATAY; HERNÁNDEZ-ANDREU, 2019).

¹ Biodefesa é definida como “(...) o desenvolvimento de capacidades e conhecimentos para avaliar, detectar, monitorar, responder e atribuir ameaças biológicas” (DIEULIIS *et al.*, 2019, p. 1)

O **Quadro 1** apresenta os principais eventos, ocorridos após a Conferência de Asilomar² e a Convenção de Proibição de Armas Biológicas e Toxinas, envolvendo a exposição de agentes biológicos de alto risco.

Quadro 1: Principais eventos envolvendo a exposição de agentes biológicos de alto risco.

ANO	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO OU DOENÇA	CLASSE	TIPO DE PROGRAMA	TIPO DE EVENTO	CONSEQUÊNCIA
1978	Plum Island, EUA	Febre aftosa	Vírus	Biodefesa	Acidente	2 bovinos mortos
1977-8	Global	Influenza (H1N1)	Vírus	Incerto	Acidente	Milhões de infectados
1978	Plum Island, EUA	Febre aftosa	Vírus	Biodefesa	Acidente	Diversos bovinos mortos
1978	<i>University of Birmingham Medical School, Reino Unido</i>	Varíola	Bactéria	Biodefesa	Acidente	1 pessoa morreu
1979	Sverdlovsk, Russia	Antraz	Bactéria	Arma Biológica	Acidente	Mais de 100 pessoas mortas
1980	Plum Island, EUA	Febre aftosa	Vírus	Biodefesa	Acidente	9 bovinos mortos
1980's	Iraque	Vários agentes	Desconhecido	Arma Biológica	Testes em humanos	Desconhecido
1981	Plum Island, EUA	Febre aftosa	Vírus	Biodefesa	Acidente	4 bovinos mortos
1987	Plum Island, EUA	Febre aftosa	Vírus	Biodefesa	Acidente	1 novilho morto
1988	Vektor, Russia	Vírus Marburg	Vírus	Biodefesa	Acidente (agulha)	1 pesquisador infectado
1990	Koltsovo, Russia	Vírus Marburg	Vírus	Biodefesa	Acidente	Surto na cidade e 1 pesquisador morreu
1999	Oblivskaya, Russia	Vírus CCHF-like	Vírus	Arma Biológica (suposta)	Acidente	69 pessoas hospitalizadas e 6 mortes
2000's	Coreia do Norte	Vários agentes	Desconhecido	Arma Biológica	Testes em humanos	Desconhecido
2002	<i>University of Texas, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2002	Fort Detrick, EUA	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Biodefesa	Sem infecção
2002	Não informado - EUA	Vírus do Nilo Ocidental	Vírus	Pesquisa	Acidente	1 soro conversão com sintomas leves
2003-6	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2003	<i>Texas A&M, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	Perda de espécimes
2003	<i>National Defense University, Taiwan</i>	SARS-CoV	Vírus	Pesquisa	Acidente	Vazamento do NB4 para o NB2. 1 pesquisador infectado
2003	Singapore, EUA	SARS-CoV	Vírus	Pesquisa	Acidente	No NB 2. 1 estudante infectado
2003	<i>University of New Mexico, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pesquisador recebeu tratamento profilático

Fonte: Adaptado de Manheim e Lewis (2022).

² Conferência a ser apresentada no sub-item 2.1.2 Biossegurança.

Continuação - Quadro 1: Principais eventos envolvendo a exposição de agentes biológicos de alto risco.

ANO	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO OU DOENÇA	CLASSE	TIPO DE PROGRAMA	TIPO DE EVENTO	CONSEQUÊNCIA
2003	Columbus, EUA	Vírus do Nilo Ocidental	Vírus	Pesquisa	Acidente (transporte)	30 funcionários do <i>Federal Express</i> foram expostos
2004	<i>National Institute of Virology, China</i>	SARS-CoV	Vírus	Pesquisa	Acidente	No NB2. 2 pesquisadores infectados espalharam para 6 a 11 pessoas da comunidade. 1 morte.
2003-6	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2003-4	<i>Infectious Disease Pesquisa, Inc., EUA</i>	Tuberculose	Bactéria	Pesquisa	Acidente	3 pessoas com infecção subclínica
2004	Plum Island, EUA	Febre aftosa	Vírus	Pesquisa	Acidente	2 bovinos mortos
2004	Vektor, Rússia	Ebola	Vírus	Biodefesa	Acidente (agulha)	1 pessoa morreu
2004	<i>Children's Hospital and Pesquisa Center, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	5 trabalhadores expostos
2004	Fort Detrick, EUA	Ebola	Vírus	Biodefesa	Acidente (agulha)	Sem infecção
2004	NIH, Bethesda, EUA	Vários agentes	Desconhecido	Pesquisa	Acidente (problema com infraestrutura)	Sem expostos
2004	<i>University of Illinois at Chicago, EUA</i>	Vários agentes	Desconhecido	Pesquisa	Descumprimento de regra	Sem expostos
2004	<i>Boston University, EUA</i>	Tularemia	Bactéria	Pesquisa	Acidente	3 pessoas infectadas
2004	UMDNJ, EUA	Peste	Bactéria	Pesquisa	Perda dos espécimes	3 camundongos morreram
2004-5	Global	Influenza (H2N2)	Vírus	-	Triagem diagnóstica	Teste enviado para 2.750 laboratórios dos EUA e 3.747 laboratórios internacionais. Sem infecção
2005	<i>Medical University of Ohio, EUA</i>	Febre do Vale	Fungo	Pesquisa	Acidente (aerolização)	1 estudante exposto
2005	<i>UNC Chapel Hill, EUA</i>	Tuberculosis	Bactéria	Pesquisa	Perda da biocontenção	Sem infecção
2005	<i>University of Chicago, EUA</i>	Antraz ou Peste	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 infecção possível
2005	<i>UC Berkeley, EUA</i>	Febre maculosa	Vírus	Pesquisa	Acidente	Extensão de expansão incerta
2005	<i>Lawrence Livermore National Laboratory to Palm Beach, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente de transporte	2 trabalhadores expostos

Fonte: Adaptado de Manheim e Lewis (2022).

Continuação - Quadro 1: Principais eventos envolvendo a exposição de agentes biológicos de alto risco.

ANO	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO OU DOENÇA	CLASSE	TIPO DE PROGRAMA	TIPO DE EVENTO	CONSEQUÊNCIA
2005-6	<i>University of Wisconsin Madison, EUA</i>	Ebola	Vírus	Pesquisa	Classificação Incorreta	Material analisado em NB2.
2006	<i>Texas A&M, EUA</i>	Febre-Q	Bactéria	Pesquisa	Acidente (aerolização)	3 trabalhadores expostos
2006	Texas, EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pesquisador exposto
2006	<i>University of Texas, EUA</i>	H3N2	Vírus	Pesquisa	Acidente	1 pesquisador exposto
2006	<i>Texas A&M, EUA</i>	Febre-Q	Bactéria	Pesquisa	Perda de espécimes	Perda de 1 rato
2007	Pirbright, Reino Unido	Febre aftosa	Vírus	Pesquisa	Acidente	4 fazendas expostas
2007	<i>University of Texas Houston Medical Center, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	4 pesquisadores expostos
2007	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2008	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 bovino infectado
2007	<i>University of Mississippi Medical Center, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Quebra de frasco	1 estudante exposto
2008	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2009	Hamburg, Alemanha	Ebola	Vírus	Pesquisa	Acidente (agulha)	1 pesquisador inoculado
2009	<i>University of Chicago, EUA</i>	Peste	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa morta
2009	Não informado - EUA	Tularemia	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2009	<i>Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, França</i>	Variante da Vaca louca	Prions	Pesquisa	Acidente (agulha)	1 pesquisadora morreu dez anos após o acidente
2010	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2010	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2010	Não informado - EUA	Peste suína	Vírus	Pesquisa	Acidente	2 animais infectados
2010	Não informado - EUA	Variola bovina	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2011	Austrália	Dengue	Vírus	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2011	<i>University of Chicago, EUA</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	-
2012	Não informado - EUA	Febre-Q	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 soro conversão
2012	Não informado - EUA	Febre-Q	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 soro conversão

Fonte: Adaptado de Manheim e Lewis (2022).

Continuação - Quadro 1: Principais eventos envolvendo a exposição de agentes biológicos de alto risco.

ANO	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO OU DOENÇA	CLASSE	TIPO DE PROGRAMA	TIPO DE EVENTO	CONSEQUÊNCIA
2012	<i>Animal and Plant Health Agency, Reino Unido</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	Envio de amostras ativas por engano
2013	Não informado - EUA	Melioidosis	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2013	Não informado - EUA	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2014	<i>Veterinary Medical Teaching Hospital, EUA</i>	Febre-Q	Bactéria	Pesquisa	Acidente	2 pessoas infectadas
2014	Coreia do Sul	Dengue	Vírus	Pesquisa	Acidente	1 pessoa infectada
2015	<i>University Pesquisa Lab, EUA</i>	Febre-Q	Bactéria	Pesquisa	Acidente	2 soros conversões
2015	<i>Government Pesquisa Lab, EUA</i>	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	1 soro conversão
2016	<i>National Center for Foreign Animal Disease in Winnipeg, Canadá</i>	Antraz	Bactéria	Pesquisa	Acidente	-
2019	<i>Lanzhou Veterinary Research Institute, China</i>	Brucella	Bactéria	Pesquisa	Acidente	65 trabalhadores e mais de 6.620 moradores infectados
2021	Taipei, Taiwan	SARS-COV-2	Vírus	Pesquisa	Acidente	1 pesquisador infectado

Fonte: Adaptado de Manheim e Lewis (2022).

Ao analisar o quadro acima pode-se verificar que a maioria das ocorrências está vinculada às exposições acidentais ocorridas em programas de pesquisa científica. Picadas de agulha ou outras perfurações na pele e exposição aos aerossóis contaminados foram os episódios mais frequentes, cujas consequências geralmente acometeram apenas os profissionais que atuavam nos laboratórios.

O quadro não retrata exposições ocorridas em serviços clínicos de saúde e obviamente não consegue esgotar todos os cenários que ocorreram no mundo, até porque muitas dessas informações são de difícil acesso ou possuem caráter reservado. Também há que ressaltar que em muitos países existem subnotificações desses tipos de acidentes, sendo divulgados apenas os que tiveram maior repercussão (MANHEIM; LEWIS, 2022).

Outro aspecto importante a ser considerado é que a maior parte dos acidentes ocorreu nos EUA, fato provavelmente relacionado: (a) a combinação entre o quantitativo de laboratórios de pesquisa aptos a manipular agentes biológicos de alto risco; (b) a capacidade investigativa; (c) a pressão imposta pelo Senado e demais autoridades norte-americanas frente aos eventos (MANHEIM; LEWIS, 2022; IMPERIALE; HOWARD; CASADEVALL, 2018).

Alguns acidentes, como o ocorrido com antraz, em 1979, em Sverdlovsk, na Rússia (devido a uma falha de comunicação sobre um filtro que foi removido para limpeza) extrapolam o ambiente laboratorial e resultam na contaminação de diversos moradores e animais que habitam as áreas próximas aos institutos de pesquisa. As investigações comprovaram que o acidente em Sverdlovsk matou aproximadamente 66 pessoas e os esporos de antraz, transportados pelos ventos predominantes, chegaram a alcançar 50 km de distância (MB, 2018).

Outro acidente relacionado à falhas em procedimentos de segurança foi um surto de febre aftosa, no Reino Unido, em 2007. O evento foi atribuído a vazamentos em tubos envelhecidos conectados a dois laboratórios. O resultado foi um surto que exigiu o abate de rebanhos em quatro locais e restringiu a exportação de carne do Reino Unido por vários meses.

Não há casos registrados no Brasil de exposição a agentes biológicos de alto risco em ambiente laboratorial, mas o perfil de incidência de acidentes e de subnotificação no contexto geral é semelhante aos observados em outros países (STEFANATI *et al.*, 2017; SALGADO *et al.*, 2016; BRASIL, 2006). Ressalta-se que os recentes investimentos em instalações de laboratórios de alta contenção (NB3) e futuramente a construção do laboratório de máxima contenção (NB4) podem modificar esse cenário.

As informações disponíveis apontam que o risco de acidentes de laboratório que envolvam a liberação de agentes biológicos existe, embora esse seja pequeno. Esse risco é quase

certamente menor do que era antes, devido à melhor compreensão da segurança (SPARTA, 2022).

O panorama apresentado acima enfatiza a necessidade da implementação de programas de gestão de biossegurança e de bioproteção. Tais programas devem envolver todos os níveis de gestão dentro das organizações, possuir um grupo consultivo interno dedicado à segurança, mapear minuciosamente os laboratórios e seus equipamentos, registrar e manter atualizadas as diretrizes e procedimentos operacionais, capacitar todos colaboradores e fomentar uma política de notificação de ocorrência ou detecção de acidentes e incidentes, incluindo a notificação a entidades externas de supervisão (WEISS; YITZHAKI; SHAPIRA, 2015).

A seguir apresenta-se brevemente alguns aspectos relativos aos conceitos e a construção histórica dos campos da Biossegurança e da Bioproteção e as suas principais contribuições frente a mitigação dos riscos para a saúde e o meio ambiente.

2.1.2 Biossegurança

O conceito de biossegurança passou a ser amplamente discutido no início da década de 1970, com a ampliação das possibilidades da biotecnologia, por meio da aplicação da tecnologia do ácido desoxirribonucleico (DNA) e do ácido ribonucleico (RNA) recombinante. Os resultados dos primeiros experimentos utilizando técnicas de engenharia genética, as questões relativas ao incentivo e ao avanço da ciência e da tecnologia e aos dilemas éticos e morais geraram inúmeras preocupações na comunidade científica mundial (ARDIÓNS; NAVARRO; CARDOSO, 2013; PENNA *et al.*, 2010).

Esse cenário fomentou a realização da Conferência de Asilomar, realizada em 1975, na Califórnia, cujo propósito foi discutir questões acerca dos riscos das técnicas de engenharia genética e a segurança dos espaços laboratoriais (SCHEID, 2011).

Após a Conferência, a União Europeia (UE) e instituições como o *National Institute of Health* e o *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC), dos EUA, e a Organização Mundial de Saúde (OMS) continuaram produzindo estudos e estabelecendo normas frente à utilização de técnicas com DNA/RNA recombinante, classificação de risco de agentes biológicos e aos diversos tipos de riscos inerentes às atividades laboratoriais (riscos biológicos, físicos, químicos, radioativos e ergonômicos). Também propuseram a inclusão de temas como ética em pesquisa, meio ambiente e animais de experimentação (CARDOSO, 2008; PENNA *et al.*, 2010).

Em 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio

Ambiente e o Desenvolvimento. Nesse evento foi pactuada a Convenção sobre a Diversidade Biológica (CDB) que define a necessidade dos países signatários estabelecerem um Protocolo Internacional de Biossegurança, propondo regras para assegurar a conservação da biodiversidade desses países, o uso sustentável e a justa repartição dos benefícios provenientes do uso econômico dos recursos genéticos, respeitada a soberania de cada nação sobre o patrimônio existente em seu território (CARDOSO, 2008).

Nos anos 2000, em Montreal, foi celebrado o Protocolo de Cartagena sobre Biossegurança da CDB, com o objetivo de:

“(...) contribuir para assegurar um nível adequado de proteção no campo da transferência, da manipulação e do uso seguros dos organismos vivos modificados resultantes da biotecnologia moderna que possam ter efeitos adversos na conservação e no uso sustentável da diversidade biológica, levando em conta os riscos para a saúde humana, e enfocando especificamente os movimentos transfronteiriços” (BRASIL, 2006).

Esse protocolo entrou em vigor internacionalmente em 2003 e no Brasil passou a vigorar apenas em 2004. Contudo, no Brasil a Biossegurança se estruturou como área específica anteriormente, entre as décadas de 1970 e 1980, seguindo as preocupações internacionais e impulsionada pelo aumento de casos de infecções graves decorrentes de acidentes ocorridos em laboratórios.

No final da década de 1980 começou a ser discutida a regulamentação da Biossegurança e em 1995 foi publicada a Lei Brasileira de Biossegurança - Lei nº 8.974, que criou a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio) com a finalidade de:

“(...) estabelecer instruções normativas, para o gerenciamento e normatização do trabalho com engenharia genética, determinando condições absolutamente seguras para o desenvolvimento desse tipo de trabalho, tanto no que se refere à adequação de infraestrutura quanto à competência técnica do pessoal envolvido, entre outras medidas relativas à Biossegurança e à aplicabilidade da biotecnologia, além de regular sobre a liberação no ambiente de organismos geneticamente modificados (OGMs) em todo o território brasileiro” (BRASIL, 1995).

Essa Lei foi reeditada, em 2005, sob o nº 11.105 e, atualmente, a CTNBio é uma instância colegiada multidisciplinar, vinculada Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, com a responsabilidade de prestar apoio técnico consultivo e assessoramento ao Governo Federal na formulação, atualização e implementação da Política Nacional de Biossegurança relativa a OGM, bem como no estabelecimento de normas técnicas de segurança e pareceres técnicos referentes à proteção da saúde humana, dos organismos vivos e do meio ambiente, para atividades que envolvam a construção, experimentação, cultivo, manipulação,

transporte, comercialização, consumo, armazenamento, liberação e descarte de OGM e derivados (BRASIL, 2005). Ela se restringe aos OGMs e a utilização de células-tronco embrionárias humanas para fins de pesquisa e terapia, não sendo suficientemente abrangente para prover a complexidade da Biossegurança no Brasil (BRASIL, 2019).

Por outro lado, a interface legislativa relacionada à Biossegurança no país é composta por um conjunto de leis e regulamentos oriundos de diversos setores do poder executivo, ministérios ou agências, em particular os Ministérios: da Saúde, Trabalho, Ciência e Tecnologia, Agricultura, Meio Ambiente, dos Transportes, da Defesa e a Agência Brasileira de Inteligência.

O **Quadro 2** apresenta as principais leis e demais normas que configuram esse arcabouço regulatório.

Quadro 2: Principais leis e demais normas relacionadas à Biossegurança no Brasil.

SETOR	DOCUMENTO	ASSUNTO
Saúde	Diretrizes Gerais para o Trabalho em Contenção com Agentes Biológicos	Orientação da estrutura física, recursos humanos e materiais que permitam o procedimento seguro dos serviços e práticas em serviços de saúde
	Classificação de Risco dos Agentes Biológicos	Lista dos agentes biológicos classificados em função do seu risco aos indivíduos e a coletividade
	Portaria 3204/10	Norma Técnica de Biossegurança para Laboratórios de Saúde Pública
	Portaria 472/09	Transporte de amostras infecciosas
	Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) 302/05 da ANVISA	Regulamento técnico para funcionamento de laboratórios clínicos
	RDC 50/02 da ANVISA	Regulamento técnico para elaboração de projetos físicos de unidades de saúde
	Lei 9431/97	Manutenção de programa de infecção hospitalar
	Portaria 2616/98	Diretrizes para a prevenção e controle da infecção hospitalar
	RDC 48/00	Roteiro de inspeção para o controle da infecção hospitalar
	RDC 81/08	Regulamento técnico para bens e produtos importados de importância sanitária
	RDC 306/04	Resíduos sólidos de saúde (RSS)
	Lei 6437/77	Configura as infrações sanitárias
Defesa	Portaria 703/05 da ANAC	Aprova a Instrução IAC 153 sobre transporte de artigos perigosos em aeronaves civis

Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

Continuação – Quadro 2: Principais leis e demais normas relacionadas à Biossegurança no Brasil.

SETOR	DOCUMENTO	ASSUNTO
Saúde Ocupacional	Lei 6514/77	Segurança e medicina do trabalho, bem como as infrações a legislação trabalhista
	Portaria 485/05	Aprova a NR 32 sobre segurança e saúde no trabalho em serviços de saúde
Ciência e Tecnologia	Lei 11.105/05	Normas de segurança e fiscalização que envolvam atividades com OGM
	Resoluções Normativas da CTNBio	Diversas normas (certificação de qualidade, transporte de OGM, liberações comerciais, importações)
Meio Ambiente	Resolução 358/05 do CONAMA	Tratamento e disposição final de RSS
Acordos Internacionais	Protocolo de Cartagena	Prevenção e controle dos riscos na transferência, manipulação e utilização de OGM
	Resolução 1540/04 da ONU	Convenção sobre a proibição de armas biológicas
	Regulamento Sanitário Internacional da OMS	Prevenção, proteção, controle e fornecimento de resposta de saúde pública à propagação internacional de doenças

Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

No âmbito do MS, a Biossegurança é tratada pela Comissão de Biossegurança em Saúde (CBS) instituída pela Portaria GM/MS nº 1.683, de 28 de agosto de 2003, e coordenada pela Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Essa Comissão é composta por representantes dessa Secretaria, da Secretaria de Vigilância em Saúde, da Secretaria de Atenção à Saúde, da Assessoria de Assuntos Internacionais de Saúde, da Fiocruz, da Fundação Nacional de Saúde e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (BRASIL, 2019).

A CBS busca mediar a relação entre o MS e as demais instituições que lidam com o tema. Suas principais atribuições são:

“(…) I - participar, nos âmbitos nacional e internacional, da elaboração e reformulação de normas no âmbito da biossegurança; II - proceder ao levantamento e à análise das questões referentes à biossegurança, visando identificar seus impactos e suas correlações com a saúde humana; III - propor estudos para subsidiar o posicionamento do Ministério da Saúde na tomada de decisões sobre temas relativos à biossegurança; IV - subsidiar representantes do Ministério da Saúde nos grupos interministeriais relacionados ao assunto, inclusive na Comissão Técnica Nacional de Biossegurança - CTNBio; V - enviar aos órgãos e entidades deste Ministério os relatórios finais e encaminhamentos resultantes de suas atividades; 1.4. Comissão de Biossegurança em Saúde Construindo a Política Nacional de Biossegurança e Bioproteção 24 VI - propiciar debates públicos sobre biossegurança, por intermédio de reuniões e eventos abertos à comunidade” (BRASIL, 2019, p. 23).

Desde sua criação, a CBS possui como objetivo a definição de estratégias de atuação, avaliação e acompanhamento das ações ligadas à Biossegurança. Nos últimos anos, a Comissão promoveu eventos, debates públicos, a elaboração e atualização das normas e diretrizes oficiais de biossegurança em saúde para o país. Essas ações têm como objetivo contribuir com a

construção da Política Nacional de Biossegurança e Bioproteção³, na qual o MS desempenha um papel de protagonismo (BRASIL, 2019).

Considerando as atividades concernentes às diretrizes e normas de biossegurança, a CBS coordena a elaboração das Diretrizes Gerais para o Trabalho em Contenção dos Agentes Biológicos e da Lista de Classificação de Risco dos Agentes Biológicos.

Na mais recente Lista de Classificação de Risco dos Agentes Biológicos, a Biossegurança é definida como:

“(…) condição de segurança alcançada por meio da aplicação de um conjunto de medidas e ações de prevenção, minimização, controle ou eliminação de riscos inerentes às atividades de pesquisa, produção, comercialização, ensino, desenvolvimento tecnológico, transporte, importação, exportação, vigilância e prestação de serviços envolvendo agentes e materiais biológicos e seus derivados potencialmente patogênicos, os quais possam comprometer a saúde do homem, dos animais, das plantas, recursos genéticos, meio ambiente ou a qualidade dos trabalhos desenvolvidos” (BRASIL, 2022, p. 8).

Ações relativas aos procedimentos (boas práticas), à adequação da infraestrutura (desenho, instalações físicas e equipamentos de proteção) e à qualificação de recursos humanos são considerados como elementos centrais na gestão da biossegurança. Neste sentido, ressalta-se a importância da adoção de medidas de contenção⁴ capazes de conter o perigo associado aos agentes biológicos, de acordo com a sua classificação de risco (BRASIL, 2019).

Essas medidas incluem barreiras físicas e biológicas, necessárias para evitar o contato ou a disseminação de agentes biológicos ativos potencialmente perigosos. As barreiras físicas estão relacionadas à infraestrutura, aos equipamentos de proteção e aos procedimentos para prevenir o contato e disseminação de agentes de risco, já as barreiras biológicas incluem a imunização e a seleção de agentes biológicos e hospedeiros que minimizem o risco em caso de exposição aos mesmos.

Considera-se que a contenção se dá em dois níveis: (1) contenção primária - proteção dos profissionais e dos usuários contra a exposição aos agentes de risco (uso adequado de equipamento de proteção individual – EPI; implementação das Boas Práticas de Laboratório – BPL; imunização); (2) contenção secundária - proteção do ambiente contra a exposição aos agentes de risco (adequação das instalações e da infraestrutura; uso adequado de equipamentos

³ O conceito de Bioproteção será apresentado no subitem 2.1.3.

⁴ O objetivo das medidas de contenção é “(...) *prevenir, reduzir ou eliminar a exposição de profissionais, de usuários do sistema de saúde, da população em geral e do ambiente aos agentes potencialmente perigosos*” (BRASIL, 2019, p. 17).

de segurança; adoção de técnicas e práticas de trabalho em conformidade com a classe de risco do agente manipulado; proteção individual) (BRASIL, 2010).

Conforme apresentado nos parágrafos anteriores, o arcabouço legal, a organização do trabalho e as práticas gerenciais são fundamentais em um programa de biossegurança institucional. Destaca-se o ferramental de análise de risco inerente às atividades realizadas nos serviços de saúde e nos ambientes de ensino e pesquisa. Sendo o foco desta tese a análise de risco biológico em ambientes de pesquisa.

2.1.2.1 Análise de Risco Biológico

A análise de risco biológico nas atividades laboratoriais é essencial para definir os procedimentos de biossegurança a serem adotados. Ela determinará os NB e conseqüentemente as características das instalações, os equipamentos de proteção coletivo (EPC) e EPIs a serem adotados, os procedimentos e as informações necessárias para mitigar o risco (CARDOSO, 2001).

O risco biológico é considerado como a “... *probabilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde humana, animal, vegetal e ao ambiente em decorrência da manipulação de agentes ou materiais biológicos infectados ou toxinas*” (BRASIL, 2022, p. 75). Sua gestão deve ocorrer em um ambiente transdisciplinar, baseado em procedimentos de boas práticas de segurança e que pondere o desenvolvimento e a divulgação de informações como prioridade (BRASIL, 2010).

A análise de risco biológico objetiva implementar ações destinadas à prevenção, ao controle, à redução ou à eliminação dos riscos em atividades com agentes biológicos. É nesse processo que se identifica o nível de contenção mais apropriado para o trabalho seguro, de acordo com as características dos agentes de risco e do procedimento analítico utilizado (BRASIL, 2022). Ela compreende três etapas: avaliação do risco, gerenciamento do risco e comunicação de risco.

2.1.2.1.1 Avaliação do Risco

A avaliação de risco de agentes biológicos considera critérios que permitem o reconhecimento, a identificação e a probabilidade do dano decorrente destes, estabelecendo a sua classificação em classes de risco distintas de acordo com a gravidade dos danos. Sua importância está na estimativa do risco, no dimensionamento da estrutura para a contenção e

na tomada de decisão para o gerenciamento dos riscos (**Quadro 3**).

Quadro 3: Matriz de classificação do risco em função do potencial de risco à saúde em relação ao potencial de contenção dos riscos associados ao agente biológico.

Potencial de Contenção dos Riscos	Potencial de Riscos à Saúde			
	Alto	Elevado	Moderado	Baixo
Baixo	4	4	3	2
Moderado	4	3	3	2
Elevado	3	3	2	2
Alto	3	2	2	1

Fonte: BRASIL, 2022

Os critérios de classificação, distribuídos em quatro classes de risco, consideram a natureza do agente biológico, a virulência, o modo transmissão, a estabilidade, a concentração e volume, a origem do agente biológico potencialmente patogênico a disponibilidade de medidas profiláticas eficazes, a dose infectante, a manipulação de agente biológico e a eliminação do agente biológico (**Quadro 4**) (BRASIL, 2022).

Quadro 4: Características das classes de risco (1 a 4) dos agentes biológicos em relação ao risco individual, coletivo e das condições terapêuticas

Classe de risco	Risco individual	Risco à coletividade	Profilaxia ou Terapia eficaz
1	Baixo	Baixo	Existe
2	Moderado	Baixo	Existe
3	Elevado	Moderado	Usualmente existe
4	Alto	Alto	Ainda não existe

Fonte: BRASIL, 2022

Os agentes da classe 1 são conhecidos por não causarem doenças no ser humano ou nos animais adultos sadios (*Lactobacillus spp.* e *Bacillus subtilis*). Os da classe 2 provocam infecções no ser humano ou nos animais, mas possuem potencial de propagação na comunidade e de disseminação no meio ambiente limitado, e para os quais existem medidas profiláticas e terapêuticas conhecidas eficazes (*Schistosoma mansoni* e vírus da rubéola). A classe 3 é composta por agentes biológicos que possuem capacidade de transmissão, em especial por via respiratória, e que causam doenças potencialmente letais em humanos ou animais, e para as quais existem, usualmente, medidas profiláticas e terapêuticas (*Bacillus anthracis* e vírus da Síndrome da Imunodeficiência Humana). Por fim, a classe 4 é constituída por agentes biológicos que apresentam grande poder de transmissibilidade, em especial por via respiratória, ou de transmissão desconhecida e não existe medida profilática ou terapêutica eficaz (vírus ebola e vírus da varíola) (BRASIL, 2022).

Embora a classificação de risco seja indicativa para a observância do NB e das práticas

indicadas para a manipulação dos agentes infecciosos, sua concentração na amostra deve ser considerada, assim como o risco de manipulação de amostras clínicas, cultivos em diversas escalas e sistemas biológicos, ou de animais infectados (BRASIL, 2022). Os subsídios oriundos da etapa de avaliação determinam o nível de contenção requerido para a manipulação do agente biológico e a partir de então, inicia-se o processo de gerenciamento do risco.

2.1.2.1.2 *Gerenciamento do Risco*

Nessa fase o foco está no estabelecimento e manutenção de ações contínuas relativas a todos os processos e ambiente de trabalho, à identificação dos perigos associados a uma metodologia ou aos produtos utilizados, à estimativa e gradação dos riscos envolvidos, bem como estratégias para reduzi-los e controlá-los, além da avaliação da efetividade dos controles estabelecidos e da qualificação dos recursos humanos (BRASIL, 2015).

A classificação de NB está subdividida em quatro níveis crescentes no seu grau de contenção e de complexidade do nível de proteção. Eles consistem na combinação de práticas e técnicas de laboratório, equipamentos de segurança e instalações ou infraestrutura laboratorial, e representam as condições nas quais o agente pode ser manuseado com segurança (CARDOSO, 2008).

No laboratório NB 1 pode ocorrer a manipulação de microrganismos pertencentes a classe de risco 1. Não é requerida nenhuma especificidade de desenho estrutural e de barreiras de contenção, porém é importante a adoção de BPL e de usuários treinados e supervisionados. É um tipo de instalação apropriada para atividades de ensino básico.

Já no laboratório NB2, pode-se manipular os agentes biológicos pertencentes a classe de risco 2. De uma forma geral, se aplica aos laboratórios clínicos, de pesquisa ou hospitalares que atuam com níveis primários de diagnóstico. Além das BPL, são exigidas barreiras físicas primárias (EPI, EPC e cabine de segurança biológica - CSB - I ou II) e secundárias (projeto arquitetônico adequado e sistema de circulação de ar que proporcionem um fluxo interno de ar, sem que haja uma recirculação para os espaços fora do laboratório). Adicionalmente, seus colaboradores devem estar imunizados e receber treinamento específico para atuar nesse tipo de contenção.

Uma instalação NB3 é considerada um laboratório de alta contenção, que permite a manipulação de agentes biológicos da classe de risco 3. Nessa classe muitos agentes possuem potencial transmissão por via respiratória e podem causar infecções sérias e possivelmente

fatais, por esse motivo exige-se barreiras primárias e secundárias mais rígidas (CBS II e III, controle de acesso restrito, adoção de filtro HEPA, controle de pressão e fluxo do ar). O usuário não pode trabalhar sozinho e toda equipe deve ser imunizada e acompanhada, com exames médicos periódicos.

O MS, lançou em 2015, um documento técnico chamado “Biocontenção – Gerenciamento de Riscos em Ambientes de Alta Contenção Biológica” com a atualização das informações sistematizadas e padronizadas necessárias para o gerenciamento do risco em laboratórios NB3 e NBA3. Nesse documento, além das BPL e das especificidades da infraestrutura física, há todo detalhamento com relação a gestão de equipamentos, aos programas de manutenção e calibração, aos processos de descontaminação de equipamentos, de superfícies, de ambientes, de grandes espaços, a gestão de resíduos e a elaboração de plano de emergência (BRASIL, 2015).

O laboratório NB4 é o laboratório que possui máxima contenção. Nesse local podem ser manipulados os agentes biológicos da classe de risco 4 ou materiais com potencial patogênico desconhecido. Há um completo isolamento dos usuários dos laboratórios em relação aos materiais infecciosos aerolizados. São adotadas CSB das classes III ou II associadas às roupas de proteção com pressão positiva, ventiladas por sistema de suporte de vida. O **Quadro 5** apresenta um resumo dos principais requisitos exigidos em relação aos NB.

Quadro 5: Principais requisitos exigidos em relação aos níveis de Biossegurança (NB).

NB	BARREIRAS DE CONTENÇÃO			
	PRIMÁRIAS			SECUNDÁRIAS
	Procedimentos/Práticas	Equipamentos de Proteção		
		Individual	Coletiva	
1	<ul style="list-style-type: none"> - Boas práticas padrão - Placa com o símbolo de risco biológico afixado na porta - Treinamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Jaleco - Luvas -Touca 	<ul style="list-style-type: none"> - Não são necessários 	<ul style="list-style-type: none"> - Pias para lavagem das mãos próximas à saída
2	Práticas de NB1 mais: <ul style="list-style-type: none"> - Acesso limitado - Precauções com materiais perfurocortantes - Manual de Biossegurança - Exame médico periódico e imunização 	<ul style="list-style-type: none"> - Jaleco - Luvas - Toucas - Máscaras 	<ul style="list-style-type: none"> - Cabine de Segurança Biológica (CSB) de classe I ou II nos procedimentos que gerem aerossóis - Autoclave no prédio 	<ul style="list-style-type: none"> - Parede, teto e piso em acabamento liso, impermeável, sem juntas e reentrâncias
3	Práticas de NB2 mais: <ul style="list-style-type: none"> - Acesso controlado - Descontaminação de todos os resíduos e EPI 	<ul style="list-style-type: none"> - Macacão - Proteção respiratória - Protetor de face e olhos 	<ul style="list-style-type: none"> - CSB de classe I ou II - Autoclave dentro do laboratório 	<ul style="list-style-type: none"> - Exaustão por filtro absoluto - Pressão negativa de ar
4	Práticas de NB3 mais: <ul style="list-style-type: none"> - Banho de descontaminação - Incineração de resíduos 	<ul style="list-style-type: none"> - Macacão de pressão positiva 	<ul style="list-style-type: none"> - CSB de classe II B2 ou classe III 	Barreiras NB3 mais: <ul style="list-style-type: none"> - Edifício separado ou área isolada

Fonte: Adaptado de LCSPES (2019).

Durante o Seminário Internacional sobre Laboratório Nacional de Máxima Contenção Biológica, organizado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações, em 2021, foi apresentada uma comparação de custos entre um laboratório NB3 e um NB4. O aumento foi na ordem de 100% ou mais, sendo que na América Latina esses valores seriam ainda mais elevados, pois os custos dos serviços especializados são altos, há falta de experiência em comissionamento e de recursos humanos capacitados para atuar nesse tipo de operação e a manutenção das instalações é elevada (CGEE, 2021).

Nesse mesmo Seminário foi apresentada a estimativa de que existam cerca de 61 unidades NB4 em todo o mundo. Dentre os BRICS, apenas o Brasil ainda não possui esse tipo de instalação, tornando-se uma questão de soberania para o país, principalmente, após a pandemia de COVID-19 (CGEE, 2021).

Para que o processo de análise de risco seja eficaz há que se considerar a etapa de comunicação de risco. Apesar de independente do gerenciamento de risco, a comunicação de risco assume um papel fundamental dentro da etapa de gerenciamento. Sem ela, é improvável que as medidas de controle reduzam o risco residual (OPAS, 2021; DE ALMEIDA, 2007).

2.1.2.1.3 *Comunicação de risco*

A Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2021) define comunicação de risco como um:

“Processo interativo e sistemático de troca de informações e opiniões sobre risco(s) que envolve de forma inclusiva todos os profissionais relevantes de várias categorias, bem como líderes e agentes comunitários quando apropriado. A comunicação de risco é uma parte integrante e contínua da avaliação de risco, que exige compreensão clara do processo de avaliação de risco e dos desfechos, visando à implementação adequada de medidas de controle de risco. As decisões sobre a comunicação de risco, incluindo o que, quem e como, devem fazer parte de uma estratégia geral de comunicação de risco” (OPAS, 2021, p. 13).

A comunicação de risco objetiva auxiliar na compreensão dos métodos de avaliação de risco, seus respectivos resultados e nas decisões das medidas de controle. Ela está intimamente relacionada com a cultura de segurança e é uma importante ferramenta para que as estratégias de redução de risco sejam efetivas. Boas práticas de comunicação são primordiais para garantir bons mecanismos de notificação frente a incidentes, acidentes ou ineficiências das medidas de controle de risco (OPAS, 2021).

A OPAS (2021) também afirma que a comunicação de risco desempenha um papel importante no relacionamento do laboratório com autoridades regulatórias e o público em geral.

E sinaliza que é essencial haver documentação por escrito para manter um registro histórico e preciso das avaliações de risco e comunicar os resultados à equipe do laboratório.

Segundo Peres (2012), a comunicação de risco precisa, inicialmente, tornar real o problema, sensibilizando cada ator envolvido da importância de se adotarem medidas que visem a garantia da saúde, do bem-estar de todos e do ambiente. A comunicação deve ser transparente entre os colaboradores da instituição, as autoridades de saúde e outros parceiros relevantes, incluindo a sociedade (DE ALMEIDA, 2007).

Ardións, Navarro e Cardoso (2013) ressaltaram que os processos de comunicação de risco devem ser éticos o suficiente para mostrar a verdadeira face da informação, incluindo o que é conhecido e que é desconhecido (incerteza científica). Além disso, recomenda-se que as abordagens adotadas nos processos de comunicação considerem os determinantes comportamentais, culturais e socioeconômicos. Sem essas particularidades os produtos da comunicação de risco podem não ser totalmente incorporados na prática das equipes de laboratório e no público em geral (DE ALMEIDA, 2007).

Frente ao exposto entende-se que a análise de risco não deve ser considerada como um mero instrumento burocrático no contexto do programa de biossegurança institucional. Trata-se de um processo multidisciplinar, contínuo, que precisa ser revisado periodicamente, especialmente, com os avanços científicos e tecnológicos vivenciados pela sociedade.

A seguir serão abordados os principais aspectos do campo da Bioproteção, considerado como campo complementar à Biossegurança.

2.1.3 Bioproteção

Assim como a Biossegurança, a Bioproteção surge para mitigar possíveis riscos relacionados a manipulação, ao transporte, a obtenção e a guarda de agentes biológicos. Mesmo sendo consideradas campos complementares, elas focalizam riscos distintos. Enquanto a Biossegurança se preocupa com princípios de contenção destinados a impedir a exposição involuntária ou liberação acidental de agentes de risco, a Bioproteção visa coibir a liberação intencional, exposição voluntária, desvio, roubo e uso indevido desses agentes (ROCHA, 2011).

A OMS sinaliza que as práticas e princípios adotados na Biossegurança são os primeiros passos para mitigar os riscos de Bioproteção, porém as ações e treinamentos de cada campo devem ser executados separadamente, pois podem gerar ações antagônicas, como por exemplo, a necessidade ou não de identificar frascos contendo materiais biológicos, que por um lado

ajudaria a reconhecer o agente biológico e por outro pode facilitar uma ação mal-intencionada. Nesse sentido, Coelho (2017) explicita a necessidade dessas estratégias serem elaboradas de acordo com as normas internacionais e/ou nacionais, mas também sejam analisadas as peculiaridades de cada instituição/local.

Berbert *et al.* (2022) apresentam três categorias de risco que são adotadas no contexto da Bioproteção: a guerra biológica; o bioterrorismo e o bioataque. A guerra biológica geralmente envolve nações, investidas militares e atentados em massa, já o bioterrorismo está mais relacionado a grupos extremistas, cujos ataques são objetivos e pontuais e o bioataque é mais associado a ações individuais, como o uso de pragas para destruir plantações de concorrentes ou provocar doenças em rebanhos, criações de peixes e crustáceos.

Historicamente, a Bioproteção começou a ganhar destaque após as repercussões do Amerithrax. Instituições como o CDC, a OMS e a Organização Mundial para Saúde Animal passaram a incluir diretrizes acerca de *laboratory biosecurity* em seus manuais de biossegurança laboratorial. Em 2006, a OMS, além de apresentar as discussões conceituais sobre *biosecurity* também divulgou um programa de bioproteção laboratorial para órgãos que utilizassem materiais biológicos de interesse (*valuable biological materials* - VBM, na sigla em inglês). Segundo Coelho (2017), a OMS considera VBM como:

"(...) todo material biológico que requer monitoramento administrativo, controle e responsabilização, além de medidas específicas de proteção e monitoramento nos laboratórios, a fim de proteger seu valor econômico e histórico e de proteger a população de seu potencial de dano. Pode incluir patógenos e toxinas, além de organismos não patogênicos, cepas vacinais, alimentos, OGMs, componentes celulares, elementos genéticos e amostras extra-terrestres" (COELHO, 2017, p. 17).

No que tange as discussões conceituais é importante destacar que essas publicações apresentam o conceito de *Biosecurity* com aplicação exclusivamente ao contexto laboratorial e na tradução oficial da OMS esse termo passou a ser traduzido como Bioproteção.

No Brasil, Coelho (2017) e Magalhaes (2013) sinalizam uma confusão entre os termos Biosseguridade e Bioproteção, causada principalmente pela tradução do termo *Biosecurity* para *Bioseguridad* em espanhol, mas ratificam que o uso de “Biosseguridade” para se referir a *Biosecurity* não é mais aconselhado no país, já que diversos órgãos governamentais brasileiros, como MS, MD e ABIN, utilizam o termo Bioproteção. Um dos exemplos é a Portaria Normativa nº 585, de 7 de março de 2013, do MD, que define Bioproteção como um conjunto de ações que visam minimizar o risco do uso indevido, roubo ou liberação intencional de material com potencial risco à saúde humana, animal e vegetal.

O termo Bioproteção também recebe destaque em instituições de referência em pesquisa no país, como a FIOCRUZ. Este abrange medidas de segurança institucional e pessoal, procedimentos para evitar a perda, roubo, uso indevido, desvio ou liberação intencional de patógenos ou partes deles, organismos produtores de toxinas, bem como toxinas, que são mantidas, transferidas e/ou fornecidas por coleções microbiológicas e/ou Centros de Recursos Biológicos (MAGALHÃES, 2013).

Coelho (2017) apresenta que o aumento da rede de laboratórios de saúde pública no Brasil, desde os anos 2000, demonstra a relevância da aplicação de medidas de biossegurança e bioproteção no país. Durante a atual pandemia de COVID-19 essa demanda veio à tona e o debate perante a necessidade da construção de um laboratório de máxima contenção como projeto estratégico torna imprescindível a criação ou o aprofundamento das normativas legais e institucionais, bem como a capacitação dos profissionais que atuam nesse contexto.

Alinhada a esses movimentos a Política Nacional de Biossegurança e Bioproteção está sendo construída no entendimento que bioproteção é executada num ambiente contido ou laboratorial e se refere a medidas de segurança institucional, pessoal e de procedimentos comportamentais para evitar perda, roubo, uso indevido, desvio ou liberação intencional, transporte, manipulação, alteração molecular e genômica de patógenos ou partes deles, de toxinas e os respectivos organismos que as produzem. Além disso, expressa que as ações de bioproteção devem ser pautadas em conhecimentos e diretrizes básicas no intuito de orientar o comportamento profissional e garantir a segurança quanto à posse, à manutenção, à guarda, à manipulação e ao provimento de materiais biológicos mantidos em ambientes contidos (BRASIL, 2019).

Segundo Brasil (2019), no Brasil, essas diretrizes consideram os protocolos e diretrizes internacionais, leis e normas nacionais e regionais. A análise de risco, a segurança física, a gestão de segurança de pessoal e de visitantes, o controle e o fornecimento de material, a segurança de transporte interno e externo, a segurança da informação e o plano de resposta a incidentes, com abordagens e práticas seguras, claras e objetivas são considerados como os princípios de bioproteção.

Outro campo de conhecimento técnico-científico que tem atuado com muita proximidade e transdisciplinaridade aos campos da Biossegurança e da Bioproteção é o da gestão de eventos QBRN. Em seguida serão abordados alguns conceitos, experiências internacionais e nacionais e estratégias voltadas para a letra “B” da sigla QBRN.

2.1.4 Gestão de eventos QBRN

O desenvolvimento da sociedade e a conseqüente expansão na produção de recursos e materiais provenientes das indústrias, acarreta o aumento da exposição dos indivíduos e do meio ambiente aos riscos inerentes da utilização de elementos químicos, biológicos, radiológicos e nucleares nestes processos. Concomitante a esse acréscimo, há registros do uso destes materiais perigosos em ações criminosas (PEREIRA *et al.*, 2019).

A liberação destas ameaças pode causar relevantes impactos à saúde pública, gerando efeitos diretos e indiretos nas condições de vida e na saúde humana e ambiental (SANDSTRÖM *et al.*, 2014). Tais fatos configuram-se como uma das principais preocupações de segurança mundial e trazem à tona a necessidade de atenção e preparação constante da sociedade (MALIZIA *et al.*, 2016).

Segundo Sandström *et al.* (2014), uma resposta rápida e adaptada para um evento QBRN, combinada com uma comunicação pública efetiva, diminui os impactos negativos sobre a saúde e os efeitos psicossociais dos envolvidos.

Coleman *et al.* (2019) apresentaram a gestão de eventos QBRN é composta por 7 elementos centrais: (1) ciências básicas e clínicas; (2) modelagem e gerenciamento de sistemas; (3) planejamento. (4) resposta e gerenciamento de incidentes; (5) recuperação e resiliência; (6) lições aprendidas; e (7) melhoria contínua.

Sendo assim, a gestão de eventos QBRN necessita desenvolver um trabalho que adote múltiplas estruturas e diferentes tipos de ferramentas de intervenção de emergência. Para Vasconcelos (2018), além destas atribuições, a gestão deve fomentar o desenvolvimento de políticas públicas que possam fortalecer a capacidade de resposta frente à estas ameaças.

O ciclo de gestão de eventos QBRN divide-se em duas etapas preventivas, planejamento e preparação, e mais duas etapas de execução, resposta e recuperação (**Figura 1**). A etapa do planejamento está relacionada com a avaliação do ambiente operacional. Ela possibilita que os gestores identifiquem padrões mínimos de treinamento, organização, equipamento e proteção de recursos. A preparação implementa o plano aprovado e os acordos relevantes para aumentar a prontidão por meio de treinamento, exercícios e certificação. A resposta atua frente aos efeitos diretos de curto prazo de um evento QBRN, incluindo ações tomadas para salvar vidas, proteger propriedades e estabelecer controle. Já a recuperação, possui o objetivo de restaurar os serviços essenciais, englobando também a conclusão da mitigação do risco (SPARTA, 2022; DEPARTMENT OF THE ARMY, 2015)

Figura 1: Ciclo da gestão de eventos químicos, biológicos, radiológicos e nucleares.



Fonte: Adaptado de *Department of The Army* (2015).

Sandström *et al.* (2014) também indicaram que as práticas relacionadas com a prevenção precisam incluir a identificação de informações importantes, como: possíveis ameaças; fontes locais de agentes QBRN; vias de exposição; impactos na saúde e na infraestrutura; métodos de mitigação e prevenção; e necessidade de comunicação. Além de incluir elementos operacionais que definem demandas na preparação de questões de avaliação, documentação, revisão pós-ação e análises pós-missão, definição de procedimentos operacionais padrão.

Ponseel, Fillon e Schuliar (2011) consideraram que os planos específicos, para cada tipo de ameaça QBRN, devem fornecer respostas rápidas em termos de organização de socorro e assistência aos feridos, tendo como principal objetivo a salvaguarda de vidas humanas.

Alguns países destacam-se pelo amadurecimento na política de atuação frente a esses eventos. Porém esta característica, geralmente, está vinculada ao quantitativo de ocorrências de eventos no território e ao nível de desenvolvimento do país (VASCONCELOS, 2018).

Os EUA é uma das nações mais preparadas e equipadas para atuar em cenários que envolvam acidentes QBRN. Após o Amerithrax, foram adquiridos distintos equipamentos e meios operativos. Também foram implementados diversos sistemas de vigilância e monitoramento em tempo real, como por exemplo, o programa *BIOWATCH*, que realiza o monitoramento do ar em mais de 30 grandes áreas metropolitanas do país (RYAN, 2016). Além disso há constante treinamento das equipes de emergência e um relevante aporte de

investimentos para pesquisa e desenvolvimento científico-tecnológico em centros de pesquisa e de análise de amostras, como o CDC (BCB, 2021).

No contexto da UE, em 2012, o Parlamento, o Conselho e o Comitê Econômico e Social Europeu sublinharam a necessidade de se reconhecer áreas críticas e priorizar esforços para aumentar a segurança da produção, armazenamento, manuseio e transporte de produtos perigosos. Além disso, eles incentivaram a criação do Plano Europeu de Ação Química, Biológica, Radiológica e Nuclear, que embasou a criação de políticas públicas que vigoram até hoje (VASILEVA; YANEVA, 2018).

Além da participação das convenções da UE, Calder e Bland (2018) sinalizaram que o Reino Unido formula planos robustos, além de promoverem formação regular e exercícios a nível regional e nacional.

Jindal e Roy (2014) apresentaram que mesmo com as políticas e diretrizes em vigor na Índia, o sistema de saúde pública do país está sobrecarregado, o que diminui sua capacidade de resposta.

Já no Brasil, grande parte das ações relativas à gestão QBRN foram historicamente impulsionadas pelo setor nuclear. O Decreto-Lei nº 1809/80, regulamentado pelo Decreto nº 2210/97, instituiu o Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (SIPRON), com o objetivo de assegurar o planejamento integrado e coordenar a ação conjunta e a execução continuada de providências que visem a atender às necessidades de segurança das atividades, das instalações e dos projetos nucleares brasileiros, particularmente do pessoal neles empregados, bem como da população e do meio ambiente com eles relacionados (BRASIL, 1997, BRASIL, 1980).

O Programa Nuclear Brasileiro (PNB), conjunto dos projetos e atividades relacionados com a utilização da energia nuclear, segundo orientação, controle e supervisão do Governo Federal, está inserido no contexto da Estratégia Nacional de Defesa (END), lançada em 2008 (RIBEIRO, 2014).

Inicialmente a END apresentou uma extrapolação do conceito de segurança nacional ao incorporar preocupações mais humanizadas e focadas na proteção do cidadão, como a segurança hídrica, energética, de transporte, de telecomunicações ou QBRN. Já a partir de sua atualização, ocorrida em 2020, demonstrou a preocupação com a melhoria da integração nacional sobre o tema, no intuito de incrementar as diversas capacidades envolvidas na prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação, em eventos adversos de natureza biológica, química, radiológica ou nuclear (SPARTA, 2022).

Um dos propósitos da END é obter domínio tecnológico do ciclo do combustível nuclear e na construção do submarino de propulsão nuclear e coube à Marinha do Brasil a condução e execução do Programa Nuclear da Marinha (PNM) e do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB), podendo também ser designada para atuar no planejamento e na resposta a acidentes radiológicos e nucleares (KNUST, 2013; RIBEIRO, 2014).

Outra grande instituição envolvida nesse propósito é a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, situada na cidade de Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Ela possui um plano de emergência composto por um conjunto de protocolos e de procedimentos necessários para responder a um acidente nuclear. Entre eles, está previsto o protocolo de acionamento inicial, para o cumprimento das providências estabelecidas pelo SIPRON (SANTOS; SILVA; CARDOSO, 2020).

Durante a elaboração desse plano, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – *International Atomic Energy Agency*) ofereceu um relevante suporte a partir de um programa de cooperação que possibilitou visitas de especialistas e contribuiu para a construção de laboratórios e treinamento de diversos profissionais da área. Além disso, foram elaborados planos de emergência que projetavam ações para lidar com a gestão de acidentes nas usinas nucleares ou com emergências radiológicas no setor de energia não nuclear (KNUST, 2013).

Esses conjuntos de medidas de emergência foram primordiais na resposta ao acidente com o isótopo radioativo do césio-137, ocorrido em 1987, na cidade de Goiânia, Goiás. Cerca de 112.000 pessoas foram monitoradas (249 apresentaram contaminação; 140 apresentaram pequena contaminação externa e 129 com contaminação externa e/ou interna e destes 20 foram internadas e 4 foram a óbito). Os impactos do acidente ultrapassaram a esfera da saúde, gerando consequências nas dimensões econômica, social e ambiental. Algumas residências e locais públicos foram contaminados e tiveram que ser demolidos. No total, foram gerados cerca de 3.500 m³ de resíduos radioativos (IAEA, 1988).

Ainda no contexto nuclear, no Brasil, os principais instrumentos jurídicos que compõem o quadro de cooperação internacional são a Convenção sobre Notificação Rápida de Acidente Nuclear e a Convenção sobre Assistência em Caso de Acidente Nuclear ou Emergência Radiológica (BRASIL, 1991a, 1991b)

Nacionalmente, ainda há a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que atua como autoridade regulatória no processo de licenciamento da compra e de transporte de fontes radioativas e na produção, uso, segurança e eliminação de materiais radioativos em suas diversas áreas de aplicação (RIBEIRO, 2014).

Conjuntamente com as normas da CNEN, na área da Saúde, a ANVISA, entre outras atividades, regula o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. A RDC nº 222/18 classifica os rejeitos radioativos como do Grupo C e indica que o gerenciamento destes resíduos deve obedecer ao Plano de Proteção Radiológica do Serviço, as Normas da CNEN e demais normas aplicáveis (ANVISA, 2018).

Em 2010, foi publicado o Manual de Ações Médicas em Emergências Radiológicas, cujo propósito elementar era fornecer orientações de ordem prática para as ações médicas e de saúde em geral, no contexto da resposta global a emergências radiológicas com vítimas de exposição às radiações ionizantes ou com outros consequentes agravos à saúde (VALVERDE; MAURMO, 2010).

Com a realização dos grandes eventos esportivos em território brasileiro, entre 2011 e 2016, ocorreram importantes avanços na gestão de eventos QBRN como política pública. Estes avanços traduziram-se com a promulgação de leis, decretos e normas, aporte de verba para aquisição de equipamentos e meios operativos para serem adotados nas repostas às emergências QBRN (SPARTA, 2022). Além disso, nas Forças Armadas (FA) ocorreram distintas reestruturações organizacionais e ativação de novas organizações militares com atividade-fim exclusivas para a defesa QBRN (VASCONCELOS, 2018; MB, 2018; EB, 2016).

Com relação ao MS, seus servidores participaram e/ou promoveram diversos treinamentos preparatórios para os jogos. Também foi elaborado o Plano de Contingência para Emergências em Saúde Pública por Agentes Químicos, Biológicos, Radiológicos e Nucleares (MS, 2014).

Todo o contexto dos grandes eventos propiciou uma integração entre as FA, alguns Ministérios (Defesa; Desenvolvimento Regional; Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, Meio Ambiente, Saúde), a Agência Brasileira de Inteligência (ABIN), Polícia Federal, a Receita Federal, o Corpo de Bombeiros e as Polícias Civil e Militar) (SPARTA, 2022).

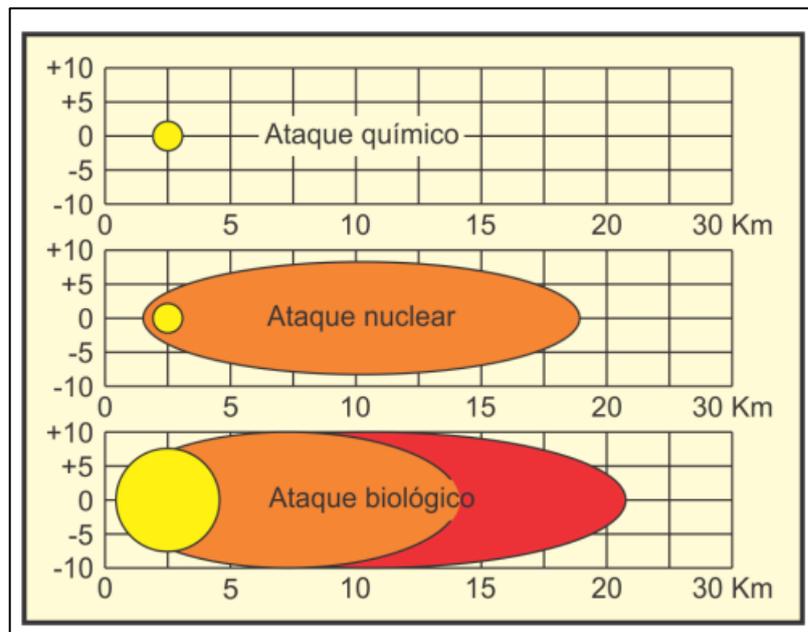
Diante do exposto, acredita-se que uma resposta rápida e estrategicamente adaptada a um evento QBRN, onde cada instituição reconheça seu devido papel perante o evento, combinada com uma comunicação pública clara e com o contínuo treinamento de distintos profissionais, diminua os impactos negativos sobre a saúde e meio ambiente.

Mais especificamente no contexto da gestão de acidentes/incidentes biológicos, existem maiores dificuldades no processo de identificação frente aos outros tipos de eventos, principalmente em relação à apresentação de sintomas, ao aparecimento de vítimas e à

persistência no ambiente. Os sintomas são tardios, as vítimas começam a aparecer gradualmente e de forma disseminada e a persistência do material pode ser considerada alta (embora não como nos casos radiológicos e nucleares) (CAVALLINI; BISOGNI; MASTROIANNI, 2014).

Outra peculiaridade é apresentada no Manual de Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica do Corpo de Fuzileiros Navais: ao comparar as áreas de cobertura de diferentes armas QBRN, uma arma biológica pode cobrir uma área mais extensa que as demais armas, ao se considerar a infectividade do agente utilizado (**Figura 2**) (MB, 2018). Essa característica também se aplica em relação a acidentes que envolvam a liberação de agentes biológicos.

Figura 2: Comparação de áreas e cobertura entre armas químicas, biológicas, radiológicas e nucleares.



Fonte: MB (2018).

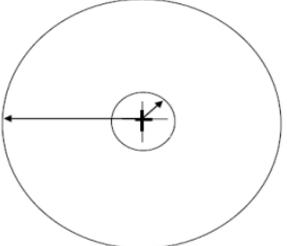
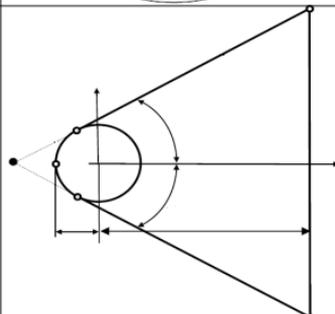
Esse Manual também estabelece como das áreas contaminadas e/ou possivelmente contaminadas durante um evento QBRN são delimitadas, processo denominado como predição.

Existem 3 níveis de predição: (a) simplificada - procedimentos simples, rápidos e sujeitos a pouca precisão que podem ser realizados, manualmente, por qualquer especialista imediatamente após o conhecimento das primeiras informações do evento. Não há capacidade de recálculo, decorrente de atualizações das condições climáticas; (b) detalhada - procedimentos que podem ser mais complexos (manuais ou automatizados) tomando-se por base o conhecimento de mais informações sobre o evento e incluindo as condições climáticas; (c) aperfeiçoada - procedimentos avançados, mais complexos e precisos, que devem ser realizados apenas de maneira automatizada (*softwares* de modelagem). Consideram informações mais detalhadas como condições climáticas locais, características do terreno, entre

outras (MB, 2018).

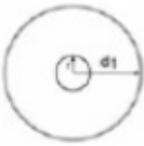
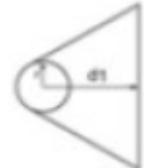
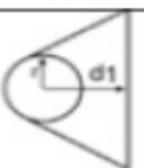
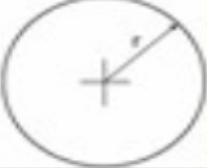
A predição simplificada para agentes biológicos é apresentada na **Figura 3** e a predição detalhada na **Figura 4**. Os cálculos de distância percorridas pela nuvem biológica e o tempo de chegada também são apresentados no referido Manual de forma mais detalhada.

Figura 3: Predição simplificada para eventos de liberação de agentes biológicos.

Caso	Velocidade do Vento	Raio da Área de Liberação	Tamanho da Área de Perigo	Representação Gráfica
1	≤ 10 km/h	2 km	10 km	
2	> 10 km/h	2 km	10 km	

Fonte: MB (2018).

Figura 4: Predição detalhada de eventos envolvendo a liberação de agentes biológicos.

Tipo de Liberação	Meio de Lançamento	Raio da Área de Liberação	Velocidade do Vento	Caso	Figura Demonstrativa
P	Bombas, Foguetes, Mísseis de Detonação de Superfície, Espargimento ou Gerador em Superfície, <i>Bunker</i> e Contêiner de Armazenamento.	2 km	≤10 km/h	1	
			> 10 km/h	2	
Q	Submunições e Mísseis de Detonação Aérea	10 km	≤10 km/h	1	
			> 10 km/h	2	
R	Geradores ou Espargimento com liberação Aérea	2 km	≤10 km/h	1	
			> 10 km/h	2	
S	Detecção após um lançamento não observado.	50 km	N/A	-	

Fonte: MB (2018).

As ações de gestão QBRN devem considerar a capacidade de contaminação, capacidade de flutuação livre, período de incubação, virulência e letalidade. Além disso, as condições de contexto/evento podem afetar a persistência dos efeitos, entre eles: escala, exposição, distância, duração, clima, mecanismo de transmissão (CAVALLINI; BISOGNI; MASTROIANNI, 2014).

Sendo assim, a importância do gerenciamento estratégico das emergências envolvendo agentes QBRN demonstra relevância e uma premente necessidade de aprofundamento sobre o tema, principalmente, no reconhecimento de ferramentas que possam auxiliar nas distintas etapas da gestão de eventos QBRN.

2.2 BACILLUS ANTHRACIS E O ANTRAZ

O *Bacillus anthracis* é o agente causador do antraz, uma doença reemergente, septicêmica, hemorrágica e letal que afeta humanos, ruminantes domésticos e animais selvagens, com ampla distribuição mundial (BOWER *et al.*, 2022; NEGRÉ, 2010).

É uma bactéria anaeróbia facultativa, gram-positiva, encapsulada, formadora de esporos e imóvel. Pertence ao filo *Firmicutes*, à família *Bacillaceae*, ao gênero *Bacillus* e ao grupo *Bacillus cereus*, que compreende pelo menos oito espécies intimamente relacionadas: *B. anthracis*, *B. cereus*, *B. thuringiensis*, *B. mycoides*, *B. pseudomycoides*, *B. weihenstephanensis*, *B. cytotoxicus* e *B. toyonensis*. A maioria dessas espécies possui relevância econômica, ambiental, médica e de biodefesa (SALGADO *et al.*, 2020).

No contexto da biodefesa, existem registros do uso do antraz em programas de armas biológicas de países como: Alemanha (Primeira Guerra Mundial); Japão (Segunda Guerra Mundial); antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (1928-1992); EUA (1941-1969) e Iraque (1970-1991), além de ataques bioterroristas, como os ocorridos no Japão (perpetrado por Aum Shinrikyo, em 1995) e o nos EUA (Amerithrax, em 2001).

Ainda nessa perspectiva, Nakpan *et al.* (2019) ressaltam que quando um estoque de agentes biológicos é intencionalmente ou acidentalmente alvejado, os esporos podem escapar, dispersar-se na atmosfera e tornar-se objeto de transporte atmosférico de curto ou longo alcance. Ademais, esses esporos bacterianos, incluindo o antraz, exibem alta resistência a estressores como temperatura, radiação ultravioleta, emissão de íons, pressão e agentes químicos, o que representa um risco para saúde humana e ambiental.

O antraz apresenta-se na natureza em 2 formas: como uma célula ativa em crescimento (forma vegetativa) ou como um esporo dormente. As células vegetativas não duram muito tempo fora do corpo do hospedeiro sem esporulação. Já os esporos apresentam uma estrutura esférica, de aproximadamente $1\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$, metabolicamente inativa e não se replicam por longos períodos. Podem ser isolados de fontes ambientais, como solo, água e produtos alimentícios. Encontram-se preferencialmente em solos com pH entre 6 e 8,5. Geralmente estão localizados nas camadas mais profundas, no entanto, atividades como arar ou drenar os carregam para a superfície (SALGADO *et al.*, 2020).

O esporo de antraz apresenta uma alta hidrofobicidade superficial, o que favorece sua permanência em água parada e, conseqüentemente, sua concentração adicional nas superfícies do solo depois que a água evapora. Uma temperatura ambiente entre 12°C e 42°C facilita a esporulação desta bactéria (WILLIAMS *et al.*, 2013).

Existem 89 estirpes conhecidas de antraz. As cepas mais conhecidas são *Ames*, *Sterne* e *Vollum*. A virulência dessas bactérias está associada a dois plasmídeos (pX01 e pX02) que carregam os genes que codificam a síntese de toxina e cápsula, respectivamente (ALAM *et al.*, 2022; JIRANANTASAK *et al.*, 2022).

Perante sua natureza infecciosa, sua capacidade de causar pânico e a necessidade do preparo dos órgãos vinculados à Saúde Pública, o CDC classifica o antraz como agente biológico da categoria A. Sua manipulação para execução de testes diagnósticos deve ocorrer necessariamente em laboratório NB2, mas atividades que envolvam criação do organismo, possibilidade de formação de aerossóis ou manejo de cepas resistentes a antibióticos exigem que o nível deva ser elevado para uma estrutura de alta contenção (NB3) (ALAM *et al.*, 2022).

2.2.1 Etiologia

A doença antraz é bem conhecida desde os tempos antigos (700 aC). Acredita-se que essa patologia tenha se originado na África subsaariana, especialmente no Egito e na Mesopotâmia. Também existem registros na Grécia e Roma (desde 700 aC) e uma provável relação com o “Black Bane” que varreu a Europa em 1600, causando mais de 60.000 mortes em humanos e gado. Durante o século XX, o antraz foi responsável por um dos maiores eventos zoonóticos registrados na história, acometendo aproximadamente 10.000 zimbabuenses entre 1978 e 1980. Mais recentemente, o evento de maior impacto foi o Amerithrax (2001) que resultou em 5 mortes e mais de 17 pessoas infectadas, além do custo total de descontaminação de cerca de US\$ 320 milhões (SCHMITT; ZACCHIA, 2012).

Os esporos bacterianos são ingeridos, inalados e podem ser transmitidos mecanicamente pela picada de insetos ou injeção, como ocorre durante os casos humanos associados à heroína. Atualmente, nenhuma evidência é sugestiva de transmissão direta de humano para humano (NORRIS *et al.*, 2020).

O período de incubação é tipicamente de 1 a 7 dias, embora os casos possam ser vistos até 60 dias após a exposição. A dose infectante varia de espécie para espécie e depende da via de exposição. A dose infectante para a contaminação cutânea é muito baixa (10 esporos ou menos), já a dose da contaminação por inalação é geralmente considerada mais alta (8.000 - 50.000 esporos) (UW OCCUPATIONAL MEDICINE, 2015).

O antraz possui três fatores de virulência principais: uma cápsula antifagocítica e duas exotoxinas, denominadas toxina letal e toxina do edema. Essas toxinas são responsáveis pelas

manifestações clínicas primárias de hemorragia, edema, necrose e morte (CDC, 2020).

2.2.2 Epidemiologia

A distribuição dos surtos de antraz varia de acordo com as práticas locais das áreas e com as interações entre humanos e animais. O antraz é uma doença listada internacionalmente com distribuição endêmica na África e Ásia, enquanto globalmente ocorre apenas em ataques intermitentes e de baixa incidência em países desenvolvidos (MUSEWA *et al.*, 2022).

Aproximadamente 20.000 a 100.000 casos de antraz humano são relatados anualmente no mundo, com a maioria ocorrendo em áreas pobres ou rurais, que geralmente têm baixas taxas de vacinação para o gado e estão relacionadas ao abate e consumo de animais doentes ou mortos por antraz (LIU *et al.*, 2020; CARLSON *et al.*, 2019).

Os surtos são frequentes em países tropicais e subtropicais com alta pluviosidade anual e são comuns após grandes eventos climáticos, como chuvas fortes após um longo período de seca, ou um verão seco após chuvas fortes, sempre em temperaturas acima de 15°C (SALGADO *et al.*, 2020).

Schild *et al.* (2006) sinalizaram que a doença ocorre em toda a América do Sul, onde o Brasil faz fronteira (compreendendo países como Argentina, Uruguai, Paraguai, Peru, Bolívia e Colômbia). A vasta extensão de fronteira do Brasil pode torná-lo vulnerável à entrada clandestina de animais contaminados.

No Brasil, essa patologia é considerada esporádica. Entre 1999 e 2016 foram notificados 110 casos de animais infectados, sendo o último caso em um bovino no Estado do Rio de Janeiro. Não existem casos recentes em humanos (SALGADO; RABINOVITCH, 2018).

O antraz cutâneo não complicado tem uma taxa de mortalidade menor que 2% com o tratamento. No entanto, a taxa de mortalidade pode chegar a 30% se infecções cutâneas localizadas progredirem para antraz sistêmico. Já a inalação de antraz tem uma taxa de mortalidade de 90%, se não tratada. A taxa de mortalidade para casos relatados de antraz gastrointestinal é de cerca de 74%, porém pode ser substancialmente mitigada por meio de tratamento. A taxa de mortalidade por injeção de antraz é de cerca de 25%.

2.2.3 Fisiopatologia

Dentro do hospedeiro, o antraz é capaz de evitar a eliminação pelo sistema imunológico

devido às suas toxinas e sua cápsula. Sua replicação dura por um período relativamente curto (20 a 40 gerações) até a morte do hospedeiro ou eliminação de bactérias vegetativas por agentes terapêuticos (PILO; FREY, 2018).

O antraz abriga dois grandes plasmídeos de virulência, pXO1 e pXO2. O plasmídeo pXO1 codifica os componentes proteicos fator de edema (FE), fator letal (FL) e antígeno protetor (AP), que são as toxinas do antraz. O plasmídeo pXO2 codifica a cápsula, o que ajuda a bactéria a evadir a resposta imune inata do hospedeiro (AHMAD *et al.*, 2022).

Durante a infecção, as células vegetativas produzem FE e AP que se combinam para formar a toxina do edema e FL e AP que se combinam para formar a toxina letal. O componente AP liga-se aos receptores celulares, o que permite que os componentes enzimáticos FE e FL sejam transportados para dentro da célula. Dentro do citoplasma da célula, FL cliva e inativa membros da família de proteínas quinases; A FE aumenta rapidamente a adenosina monofosfato (AMP) cíclico, resultando na ativação de vias de sinalização através da proteína quinase A. No início da infecção, as toxinas têm como alvo as vias celulares, inibindo as respostas imunes inatas do hospedeiro, como iniciação de neutrófilos, quimiotaxia e produção de quimiocinas. Ao desativar essas respostas imunes inatas críticas no local da infecção, as bactérias podem evadir a resposta imune, disseminar-se por todo o hospedeiro infectado e produzir grandes quantidades de toxina (BOWER *et al.*, 2022).

Dependendo da via de inoculação, as características clínicas também podem incluir falta de ar, dor abdominal, náusea/vômito, dor de cabeça ou estado mental alterado (BOWER *et al.*, 2022). O antraz cutâneo é a forma mais comum, representando mais de 95% dos casos humanos. É tipicamente uma infecção localizada da pele, geralmente ocorrendo no rosto, pescoço, braços ou mãos. A lesão cutânea inicia-se como uma pápula pruriginosa que progride para uma vesícula e depois para a clássica escara necrótica preta (CDC, 2020).

A ingestão de antraz geralmente resulta do consumo de carne infectada. Existem duas formas de ingestão de antraz. A forma orofaríngea é menos comum e ocorre com infecção da orofaringe. Isso pode resultar em inchaço do pescoço e comprometimento respiratório. A forma gastrointestinal ocorre quando os esporos germinam e infectam o sistema digestório posterior e pode estar associada a febre/calafrios, dor abdominal, náusea/vômito, ascite, fadiga, diarreia (que pode ser sanguinolenta) e dor de cabeça (BOWER *et al.*, 2022).

O antraz por inalação resulta da inalação de esporos aerolizados. Pode ter uma apresentação bifásica que começa como uma doença leve “viral” com febre, tosse e fadiga, seguida pelo início súbito de desconforto respiratório grave, dispneia e hipóxia 2 a 3 dias depois

(BOWER *et al.*, 2022).

O antraz por injeção é uma forma relativamente nova que ocorre exclusivamente em usuários de drogas que injetam heroína contaminada com esporos de antraz; até à data, os casos só foram identificados na Europa. Os sintomas do antraz por injeção são semelhantes aos do antraz cutâneo, mas geralmente estão associados a uma infecção tecidual mais profunda, resultando em doença sistêmica (BOWER *et al.*, 2022; HENDRICKS *et al.*, 2014).

2.2.4 Diagnóstico e Tratamento

O antraz pode ser identificado usando uma bateria de testes bacteriológicos específicos que examinam a morfologia da colônia, coloração da cápsula, ausência de hemólise, sensibilidade ao fago γ , sensibilidade à penicilina e motilidade. No entanto, algumas cepas podem apresentar variabilidade em termos de fenótipo, dificultando a identificação e diferenciação exata entre o antraz e outros tipos de *B. cereus*, embora essas duas espécies apresentem diferentes manifestações patológicas (PILO; FREY, 2018).

De acordo com HENDRICKS *et al.* (2014), o antraz cutâneo sem edema ou que apresenta sintomas significativos pode ser tratado com ciprofloxacina, levofloxacina, moxifloxacina ou doxiciclina. Já o esquema de tratamento de casos oriundos de inalação ou outras formas da doença exige terapia com 3 antibióticos (≥ 2 que apresentem atividade bactericida, por exemplo, ciprofloxacina, penicilina G, meropenem; e ≥ 1 que seja inibidor de síntese de proteína, como linezolida, clindamicina, rifampina, cloranfenicol). Também há indicação de utilização de corticoides em casos de meningite e edema mediastinal grave, mas sua utilização ainda é foco de algumas pesquisas .

No atual Manual de Defesa Nuclear, Química, Biológica e Radiológica da Marinha do Brasil, o tratamento preconizado é a administração de ciprofloxacina (400mg endovenosa a cada 12h por 60 dias em adultos e de 20 à 30mg/kg - máximo 1g/dia em crianças), podendo ser alterado para a penicilina G ou doxiciclina, se o isolado for sensível. Podendo ser alterado para via oral, caso haja uma melhora clínica (COMANDO-GERAL DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS, 2018).

Com relação as vacinas, a primeira vacina contra o antraz para uso humano foi produzida na década de 1950 nos EUA e em 1970 foi permitida para uso. Até os ataques do Amerithrax nenhum avanço havia ocorrido em relação ao seu uso, mas após o referido evento, novos investimentos foram executados (AHMAD *et al.*, 2022).

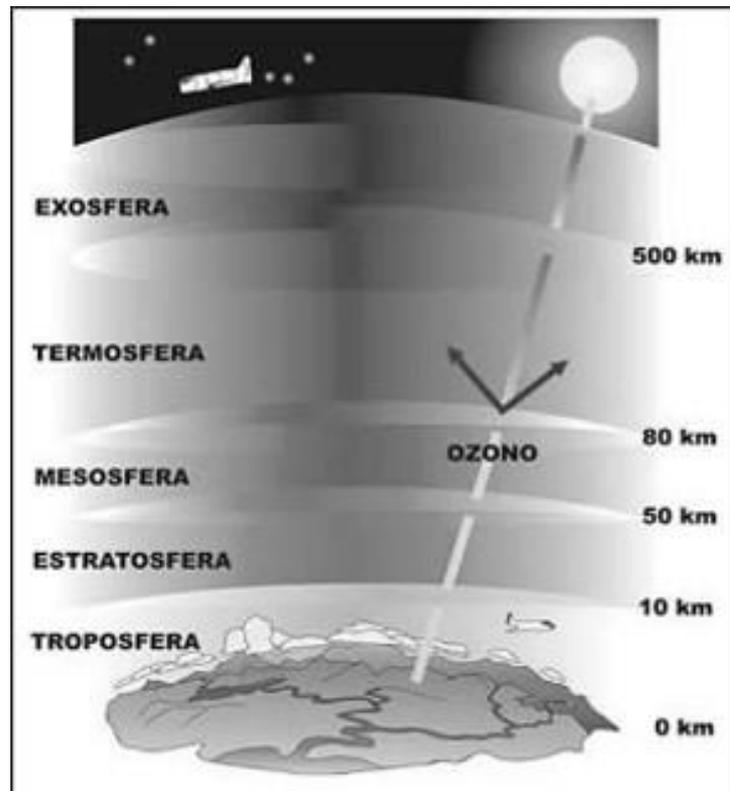
Nos EUA, o atual cronograma de profilaxia pré-exposição da vacina BioThrax® inclui uma série primária de três doses de injeções intramusculares (aos 0, 1 e 6 meses), seguidas de vacinações de reforço aos 6 e 12 meses e reforços anuais. A vacina aprovada no Reino Unido é oferecida em doses de 0, 3, 6 e 32 semanas, com reforços anuais. Também existem vacinas aprovadas na Rússia e na China (AHMAD *et al.*, 2022). No Brasil, há apenas a vacina de uso veterinário anticarbunculo.

2.3 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

2.3.1 Principais aspectos

A atmosfera terrestre é essencial para manutenção da vida no planeta. Ela é dividida em cinco camadas: troposfera (≤ 10 km); estratosfera (>10 km até 50 km); mesosfera (>50 km até 80 km); termosfera (>80 km até 500 km); e exosfera (>500 km (**Figura 5**)).

Figura 5: Camadas da atmosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de Boligian e Santos (2009).

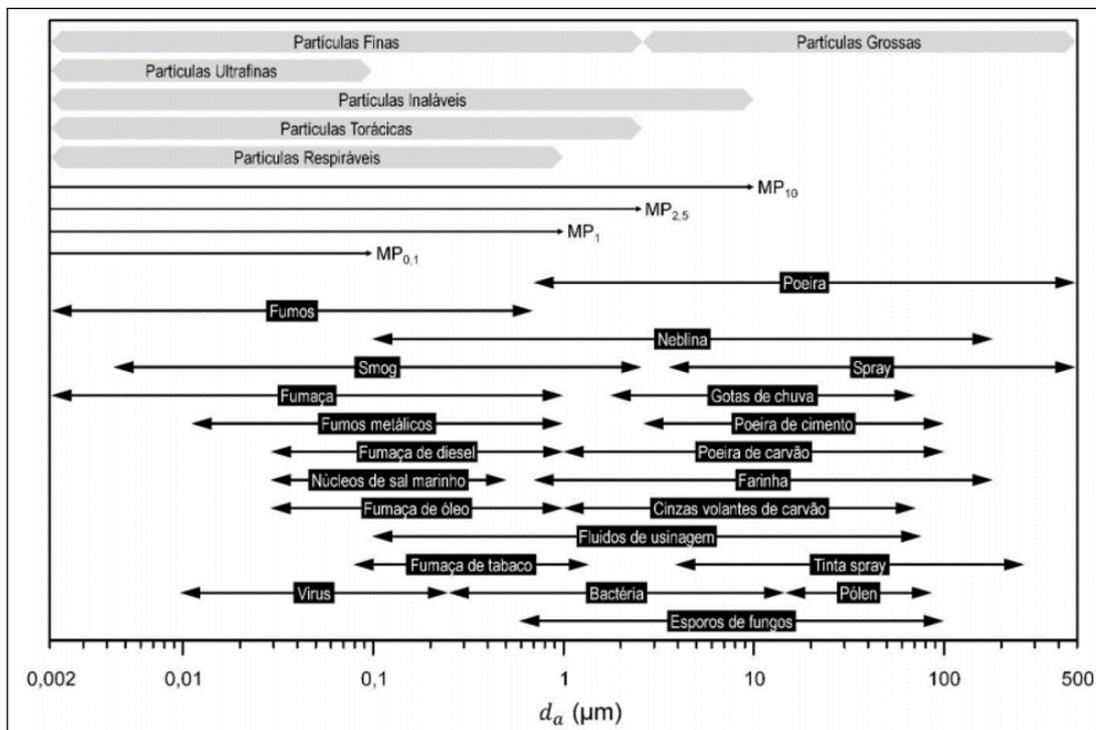
Diversos gases como o nitrogênio, o oxigênio e o argônio, entre outros componentes que se apresentam em quantidades menos abundantes, como o dióxido de carbono, metano,

ozônio e o material particulado (MP), constituem a atmosfera (SILVA *et al.*, 2018).

O MP pode ser emitido por fontes naturais (spray oceânico, erosão, vulcões) ou por fontes antrópicas (poluição) e ainda ser formado a partir de reações secundárias com outros componentes atmosféricos. Ele também é o responsável pela formação de aerossóis, definidos por Quéré e Saltzman (2013), como “*uma dispersão de partículas sólidas e líquidas suspensas em gás*”.

O MP apresenta diâmetros aerodinâmicos distintos e essa característica é adotada como critério de classificação, conforme demonstrado na **Figura 6**.

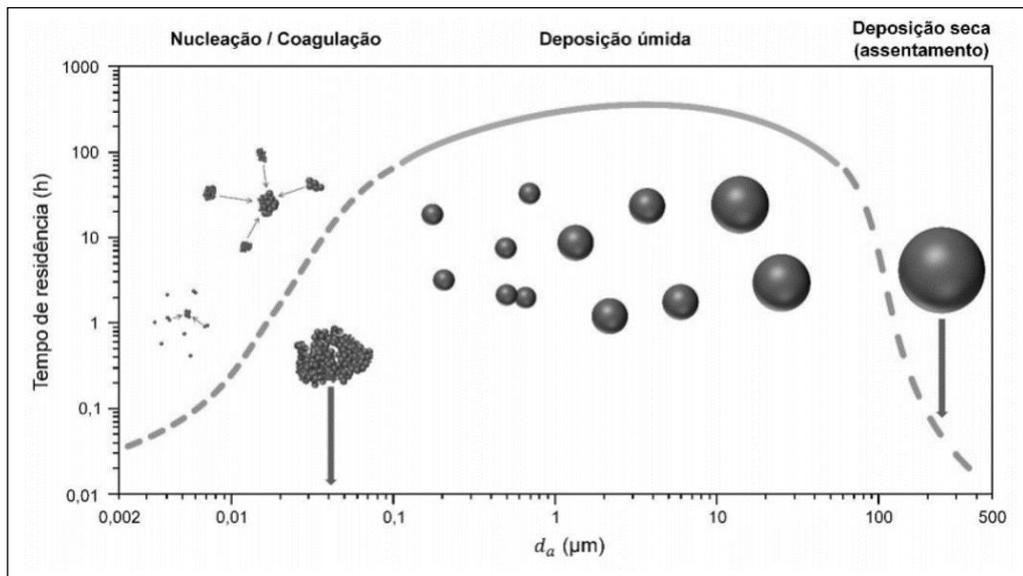
Figura 6: Classificação por tamanho e composição do material particulado atmosférico em relação à sua fonte.



Fonte: Silva *et al.* (2018).

Segundo Silva *et al.* (2018), o tamanho da partícula tem relação direta com sua presença e seu transporte na atmosfera. Diferentes processos físicos, como coagulação, deposição úmida e deposição seca, influenciam na deposição destas partículas na superfície terrestre (**Figura 7**).

Figura 7: Formas de deposição de partículas atmosféricas, de acordo com o tamanho e tempo de residência.



Fonte: Silva et al. (2018).

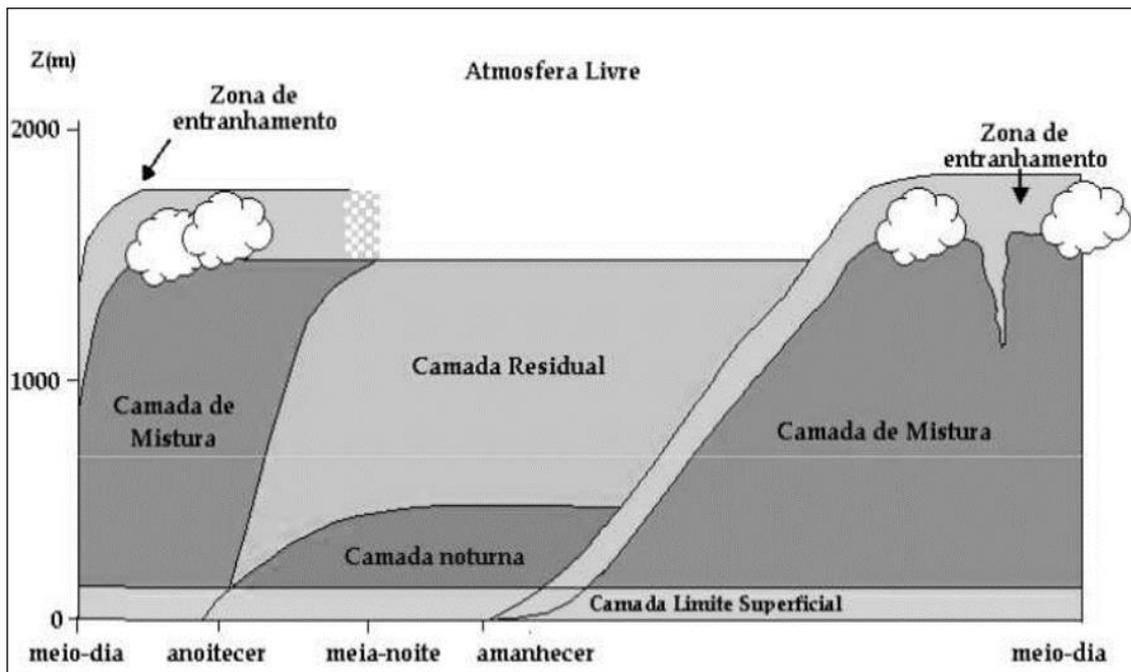
Esses mesmos autores apresentam que a deposição seca ou assentamento atua em partículas com dimensões maiores a $50 \mu\text{m}$ e que o fenômeno denominado coagulação envolve a remoção de partículas menores do que $0,1 \mu\text{m}$, por meio de formação de agregados de maior dimensão.

Já as partículas que possuem dimensões entre o intervalo $>0,1 \mu\text{m}$ e $<50 \mu\text{m}$ se acumulam na atmosfera, experimentando tempos de residência mais longos (de 7 a 10 dias). Elas são operacionalmente definidas como partículas totais em suspensão e o principal processo capaz de remover estas partículas da atmosfera é a deposição úmida, ou seja, eventos de chuva.

Dentre as camadas da atmosfera, apenas a troposfera possui contato direto com a superfície terrestre e é nesta camada que ocorre a maioria dos fenômenos que governam as condições climáticas, como a formação de nuvens, chuvas e ventos, além dos que envolvem os ciclos biogeoquímicos (DELORT; AMATO, 2018).

Segundo Salazar (2016), a região mais interessante para a dispersão de aerossóis é a camada limite atmosférica (CLA) ou camada limite planetária (CLP), parte mais inferior da troposfera, com extensão de 1 a 2 km. Esta camada apresenta uma natureza única se comparada com as demais, em decorrência de seu contato com a superfície terrestre (**Figura 8**).

Figura 8: Camada limite atmosférica.



Fonte: Salazar (2016).

Em condições climáticas favoráveis, a CLA diurna, chamada de camada de mistura (CM), é estaticamente instável e apresenta fluxo térmico positivo (devido à convecção térmica associada ao aquecimento da superfície); à noite, a CLA se divide em duas camadas: uma camada limite noturna (CLN), estaticamente estável, com fluxo térmico negativo; e a camada residual (CR), estaticamente neutra, acima da CLN, com as mesmas características da CM, porém com fluxo térmico próximo de zero.

Dentro da CLA existe uma camada em contato direto com o solo, que constitui os 20 a 200 metros inferiores, chamada de camada limite superficial (CLS). Esta é caracterizada por fluxos turbulentos uniformes. Entre a CLA e atmosfera livre encontra-se a zona de entranhamento de ar, ou camada de inversão, região fortemente estável.

A dispersão de substâncias em qualquer matriz ambiental (água, solo, ar) é resultado da combinação dos processos de advecção e difusão. A advecção consiste no transporte de elementos devido ao movimento do fluido. Na difusão, o transporte das moléculas ocorre de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração, mesmo na ausência de movimento do fluido, devido ao gradiente de concentração (RODRIGUES, 2016).

A CLA é em grande parte responsável pelo transporte de aerossóis biológicos primários (ABP) em curtas e longas distâncias (SEIFRIED, 2014). Os ABP, ou bioaerossóis, são partículas que compreendem organismos vivos e mortos, unidades de dispersão (como esporos e pólen) e vários fragmentos ou excreções (resto de plantas, toxinas) (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*,

2016).

Além de serem elementos vitais para o desenvolvimento, evolução e dinâmica dos ecossistemas, os bioaerossóis também podem carrear diversos agentes patogênicos e alérgenos, o que representa implicações na saúde pública, na agricultura e na pecuária, tendo se revelado como principal objeto de estudo do campo da Aerobiologia (DELORT; AMATO, 2018; YOO *et al.*, 2017; VAN LEUKEN *et al.*, 2016).

2.3.2 Aerobiologia

Aerobiologia é uma ciência interdisciplinar que se destina a estudar diversas características de partículas biológicas que são transportadas pelo ar (GALÁN *et al.*, 2017). Há uma ampla variedade de materiais com diferentes origens, formas e tamanhos, de alguns nanômetros a centenas de microns, tais como plantas e detritos animais, grãos de pólen, fragmentos de biofilme, esporos e células de bactérias e fungos, e vírus, bem como seus fragmentos e excreções (KIM; KABIR; JAHAN, 2018).

Concentrações humanas nas grandes cidades, atividades agrícolas e industriais (gado, culturas cultivadas, agricultura intensiva, instalações de processamento de madeira e turfa, plantas de tratamento de resíduos, plataformas de compostagem, torres de refrigeração, etc.) e, principalmente, as plantas constituem importantes fontes de bioaerossóis (DELORT; AMATO, 2018).

Os ABP constituem uma fração substancial da carga de aerossóis atmosféricos, correspondendo a cerca de 30% em ambientes urbanos e rurais e até ~ 80% em ar puro de florestas tropicais (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016).

O transporte desses bioaerossóis pode ocorrer em diversas escalas espaciais e conforme (DELORT; AMATO, 2018), pode ser visto como um evento que envolve três etapas principais: (a) emissão de uma fonte; (b) transporte na atmosfera, que inclui a fuga para o espaço aéreo, a subida para a CLA ou superior e o transporte horizontal ao longo de uma série de escalas; e (c) deposição em vários tipos de superfícies (plantas, solo, água, superfícies construídas, etc.). Esse mesmo autor sinaliza, que ainda há um processo adicional: a alteração das propriedades biológicas à medida que estas partículas viajam, pois os microrganismos tendem a perder viabilidade sob o efeito da radiação ultravioleta ou dessecação.

Sendo assim, diversos fatores meteorológicos moldam fortemente a concentração e composição da microflora transportada pelo ar, como por exemplo, a temperatura, a umidade

relativa do ar, as chuvas, a interação com outras partículas oxidantes (OH, O₃, H₂O₂) e a privação de nutrientes (YOO *et al.*, 2017; HADDRELL; THOMAS, 2017).

A capacidade de sobreviver na atmosfera difere significativamente de um microrganismo para outro. Microrganismos descritos como onipresentes no ar (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Alternaria*, etc.) desenvolveram mecanismos para lidar com as diferentes tensões que lhes permitem sobreviver por longos períodos na atmosfera. A pigmentação, a esporulação e a fixação às partículas vêm sendo consideradas por vários autores como importantes mecanismos de proteção contra a radiação solar. Porém, considera-se que uma grande parte da diversidade microbiana emitida a partir das fontes não é capaz de sobreviver por um longo período e só seja encontrada localmente, próximo do ponto de emissão (DELORT; AMATO, 2018).

Estudos relatam alta resistência de certas espécies de bactérias ao frio, a luz ultravioleta e a outras tensões que podem ser encontradas na atmosfera (COMERIO *et al.*, 2007). Espécimes vivos foram recuperados de altitudes de várias dezenas de quilômetros acima do nível do solo (YOO *et al.*, 2017). Há uma variabilidade temporal muito alta no número de bactérias e composição no ar após periodicidades diurnas e sazonais: sua concentração é em geral mais alta durante os períodos quentes do ano do que no inverno, e durante o dia do que durante a noite devido a fluxos ascendentes que elevam as células das superfícies (DELORT; AMATO, 2018).

Já em relação aos vírus, que são a menor classe de bioaerossóis, eles podem ser encontrados associados a partículas de todos os tamanhos, mas são geralmente encontrados em agregados complexos de vários microns de largura (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016). Griffin (2007) *apud* Delort e Amato (2018), demonstrou que diversos vírus no solo podem ser aerolizados e transportados por longas distâncias. O autor lança a hipótese de que um vírus aerolizado com outras partículas será menos sobrecarregado por condições ambientais, como radiação UV e temperatura, pois outras partículas irão agir como escudos. A natureza do material aerolizado junto com vírus irá, portanto, desempenhar um papel na sua sobrevivência. relatam que alguns vírus, como por exemplo, o da febre aftosa podem ser aerotransportados até uma distância de 60 km da fonte (PRUEKSAKORN *et al.*, 2012).

Outros microrganismos que apresentam resistência a dessecação e outras tensões ambientais e atmosféricas, são os fungos. Como parte do estágio sexual ou assexual do ciclo de vida, dependendo da espécie, ocorre a liberação de estruturas denominadas esporos. Estes esporos, cuja forma e tamanho podem variar entre 2 e 56 µm de diâmetro de acordo com a

espécie, possuem características morfológicas que facilitam propositalmente a dispersão dos mesmos através do ar (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016).

Sesartic e Dalla Fior (2011) ressaltaram que quanto ao seu comportamento de transporte, a maioria dos esporos fúngicos não percorre distâncias muito longas. Apenas cerca de 10% de todos os esporos liberados alcançam mais de 100 m, chamada de fração de escape. Porém, a maior parte desses esporos fúngicos transportados pelo ar está dentro da fração respirável de aerossóis (por exemplo, $<8 \mu\text{m}$) e estima-se que 30-35% das espécies sejam potencialmente alergênicas para humanos. A inalação de partículas fúngicas (esporos, fragmentos de micélio) ou seus metabólitos aéreos (micotoxinas, compostos orgânicos voláteis) levam a sintomas irritantes e inespecíficos em pessoas sensíveis (ROSSODIVITA *et al.*, 2019).

O tamanho das partículas também está relacionado ao potencial de gerar efeitos adversos à saúde. O trato respiratório superior consegue barrar as partículas de fração grossa, já as frações finas são capazes de penetrar até o nível dos alvéolos pulmonares e as ultrafinas conseguem passar pelos alvéolos e chegar ao sistema circulatório (SILVA *et al.*, 2018).

Atualmente, a aerolização é o método de dispersão mais eficaz de armas biológicas (SEIFRIED, 2014) e de acordo com Neves (2016), o sucesso do emprego das armas biológicas depende de diversos fatores, como por exemplo: direção do vento, temperatura, condições climáticas e o conhecimento destes aspectos, por parte dos agressores, pode minimizar os efeitos erráticos da liberação destes patógenos em campo aberto.

Perante a essa diversidade de bioaerossóis e a complexidade do tema, a simulação do transporte atmosférico tem se configurado como um marco para a previsão da dispersão dessas partículas em distintas escalas (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016; VAN LEUKEN *et al.*, 2016).

Uma ampla variedade de modelos computacionais tem sido desenvolvida na área das Ciências Atmosféricas para simular o fluxo de vento, bem como o transporte de massas aéreas, dispersão e deposição de partículas. Estudos como os apresentados por Maya-Manzano *et al.* (2021), Delort e Amato (2018), Bryan (2017), Van Leuken *et al.* (2016) e Ansari *et al.* (2015) refletem esta variedade e têm conseguido demonstrar o potencial desta ferramenta frente a tentativa de compreensão dos fenômenos químicos, físicos e biológicos que regem a dispersão atmosférica de microrganismos.

2.3.3 Modelos computacionais de dispersão atmosférica e simulação de cenários

Modelos são utilizados para alcançar representações simplificadas e, portanto, aproximadas de distintas situações. Nas últimas décadas, os modelos computacionais vêm sendo adotados como ferramenta capaz de compreender e estimar os diversos tipos de eventos (VISSCHER, 2014).

A modelagem computacional trata da simulação de soluções para problemas, analisando os fenômenos, desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição, e elaborando códigos computacionais para a obtenção de soluções. Desta forma, a modelagem revela-se como ferramenta importante na estimativa de cenários futuros (CHWIF; MEDINA, 2010).

Os modelos matemáticos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Os determinísticos são aqueles que lidam com valores de entrada exatos, resultando em uma simulação independentemente da quantidade de replicações utilizadas. Já os modelos estocásticos trabalham com uma ou mais variáveis aleatórias ou incertas como entrada e levam a saídas aleatórias (SILVA *et al.*, 2014).

Os modelos determinísticos são desvantajosos por utilizar dados com valores medianos, obtendo resultados que se distanciam dos reais. Já simuladores estocásticos são capazes de simular uma aleatoriedade do sistema real através de distribuições probabilísticas, estas representando matematicamente as chances de ocorrência das atribuições possíveis às variáveis (SILVA *et al.*, 2014).

A modelagem da dispersão atmosférica (MDA) é realizada a partir de modelos de dispersão, que utilizam algoritmos matemáticos para simular o transporte, a dispersão e a deposição de diferentes elementos carregados pelo ar. Estes modelos são alimentados com dados meteorológicos e da fonte de emissão, no intuito de predizer a concentração nos receptores e possibilitar a avaliação espacial e temporal da dispersão (RODRIGUES, 2016; LEELÖSSY *et al.*, 2014; MOREIRA; TIRABASSI, 2004).

Durante a utilização dos referidos modelos, além das características da fonte emissora e das informações meteorológicas, outras variáveis são consideradas essenciais, tais como: orografia do terreno (plano ou complexo); classe de escala espacial atmosférica (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 km); e a resolução temporal da concentração (episódico; breve intervalo; climatológico) (VISSCHER, 2014; OKE, 1997).

Conforme abordado por Visscher (2014), os modelos de dispersão são potencialmente

mais precisos à medida que se tornam mais fundamentais, ou seja, mais intensivos em termos computacionais. Os MDA adotam distintos tipos de modelagem, como por exemplo: a modelagem gaussiana, a euleriana, a lagrangeana e o modelo *puff*.

A modelagem gaussiana considera o vento constante e turbulência homogênea. Essas condições são dificilmente encontradas na CLP, por isso este modelo é mais limitado (TADANO; MAZZA; TOMAZ, 2010).

Já os modelos eulerianos baseiam-se em um grade fixa no espaço onde a concentração em função do tempo é descrita para um observador em um local específico, considerando na maioria das vezes a equação de advecção-difusão (VAN LEUKEN *et al.*, 2016).

Com relação aos modelos lagrangeanos, estes também adotam a equação de advecção-difusão, porém consideram o referencial em movimento. Estes modelos permitem a visualização da origem e do destino das partículas ou das massas de ar (trajetórias *backward* e *forward*). Além disso, Leelössy *et al.* (2014) apresentaram que os modelos langrangeanos calculam trajetórias onde há influência de efeitos determinísticos (campo de vento e fluutuabilidade) e estocásticos (turbulência).

Fröhlich-Nowoisky *et al.* (2016) sinalizaram que os MDA, de maneira geral, são altamente dependentes da representação correta das emissões e das propriedades e modificações das partículas que podem ocorrer durante o transporte, bem como da representação correta dos próprios processos de transporte e de pequena escala.

Todavia, Van Leuken *et al.* (2016) afirmaram que os modelos eulerianos e lagrangeanos são adequados tanto para simular condições homogêneas e estacionárias, quanto para condições heterogêneas e não estacionárias, além de ter a capacidade de analisar superfícies planas ou com muita topografia. Ademais, apresentam resolução espacial geral da ordem de dezenas a milhares de quilômetros.

Atualmente, a aplicação da modelagem e da simulação está diretamente aplicada em diversas áreas de atuação, tais como: estudos de licenciamento ambiental de projetos e empreendimentos; análise de risco de acidentes industriais; planejamento urbanos e cidades; aerobiologia; plano de resposta à emergência; vigilância em saúde (YANG; OU, 2018; DELORT; AMATO, 2018; RODRIGUES, 2016; STEIN *et al.*, 2015; SILVA, 2013; PRINSLOW, 2011).

Van Leuken *et al.* (2016) listaram alguns MDA adotados para analisar a dispersão de bioaerossóis, foram eles: *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), HYSPLIT, *Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment* (NAME), *Risø Mesoscale PUFF Model* (RIMPUFF).

Segundo a revisão desses autores, a maioria desses MDA, não realizou análises quantitativas e aplicação de avaliações quantitativas de risco microbiano. Porém, demonstraram a capacidade de descrever o transporte de gases e partículas provenientes de fontes humanas, pecuárias e industriais, o que pode auxiliar na compreensão de situações concretas e na prospecção de distintos cenários.

Da Silva Souza e Takahashi (2018) pontuaram que uma das principais vantagens da análise de cenários futuros está no fato do planejamento ser um método flexível e instigante. Onde há a possibilidade de identificar oportunidades para a inovação, de modo a propiciar o delineamento de planos estratégicos e uma visão de futuros resiliente a ambientes ameaçadores. Desta forma, a ciência da simulação apresenta-se como um campo próspero, cujo horizonte é extremamente desafiador (ARMSTRONG, 2017).

2.3.3.1 Modelo HYSPLIT

O modelo HYSPLIT é um sistema completo para calcular trajetórias simples de parcelas de ar, bem como simulações complexas de transporte, dispersão, transformação química e deposição. Foi criado no início da década 1980 no *Air Resources Laboratory* (ARL) do NOAA e é um dos modelos de transporte e dispersão atmosféricos mais utilizados na comunidade de ciências atmosféricas (NOAA, 2022).

De acordo com o Manual do Usuário, os principais componentes do modelo são: meteorologia, trajetórias, dispersão e concentração do ar. Os dados meteorológicos, como direção do vento, velocidade, temperatura, umidade, são fornecidos em uma grade espaçada regular em vários níveis na atmosfera. A trajetória é considerada o caminho de um único ponto hipotético que é carregado passivamente com o vento médio, sendo que os dados meteorológicos são atualizados a cada etapa de integração. Já a dispersão é introduzida calculando a trajetória para muitos pontos. No entanto, cada trajetória é perturbada pela turbulência atmosférica aleatória ao longo de seu caminho. As concentrações de ar são calculadas somando a massa das partículas computacionais e dividindo pelo volume de sua distribuição horizontal e vertical (NOAA, s.d.)

Os dados meteorológicos são previamente gradeados em uma das três projeções de mapa (Polar Estereográfico, Lambert Conformal e Mercator) e o modelo exige os seguintes

requisitos mínimos: U e V (direção e velocidade - componentes horizontais do vento), T (temperatura), Z (altura), P (pressão) e P0 (pressão de superfície) (DRAXLER; HESS, 2020). Atualmente, existem diversos bancos de dados disponíveis em servidores *File Transfer Protocol* (FTP), seja exclusivamente para a área da América do Norte, como por exemplo: *High-Resolution Rapid Refresh* (HRRR-3km); *North American Mesoscale Model* (NAM-12km e NAM-12km *Hybrid*); *Weather Research and Forecasting Model - Advanced Research WRF* (WRF-ARW-27km); ou banco globais, tais como: GFS 0.25°; GDAS 0.5° e 1° e *Reanalysis 2.5°*.

Como resultados das modelagens é possível produzir gráficos de modelo meteorológico que incluem meteorogramas, aerogramas, rosas dos ventos, sondagens verticais, gráficos de séries temporais de estabilidade atmosférica e os mapas meteorológicos mais tradicionais, como precipitação e pressão média ao nível do mar. Quanto ao modelo de dispersão é possível gerar mapas de concentrações de ar, deposição, doses radiológicas, tempo de chegada e posições de partículas. Já em relação aos produtos das trajetórias, é possível obter quatro tipos de resultados: (a) trajetória simples - útil para determinar possíveis regiões de origem que contribuem para medições de poluentes selecionados ou para determinar massas de ar que podem ter afetado um local em estudo; (b) matriz de trajetórias - pode fornecer uma medida das direções de transporte dentro do domínio sem ter que percorrer muitas trajetórias únicas; (c) conjunto de trajetórias - auxilia na determinação da possível incerteza de uma trajetória individual para os dados meteorológicos entorno do local de origem; (d) frequência de trajetória - apresenta as áreas de origem a favor do vento que podem ter impactado as concentrações de ar medidas em um local de partida (NOAA, 2019).

A análise de trajetórias é uma ferramenta científica usada para examinar os padrões de transporte e os processos dinâmicos das massas de ar (STOHL, 1998). Elas permitem a visualização dos movimentos do ar e podem ser utilizadas para definir possíveis deslocamentos de partículas transportadas pelo ar (ZEMMER, 2012). Os tipos de direção do cálculo das trajetórias denominam-se *backward* (adotado para determinar a origem das massas de ar em relação à fonte receptora) e *forward* (empregado para descrever os processos de transporte a partir da fonte emissora).

Segundo Stein *et al.* (2015), o HYSPLIT utiliza como método de cálculo:

“(...) um híbrido entre a abordagem Lagrangeana, usando um referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão à medida que as trajetórias ou parcelas de ar se movem de sua localização inicial, e a metodologia Euleriana, que usa uma grade tridimensional fixa como um quadro de referência para calcular as concentrações de poluentes no ar” (STEIN *et al.*, 2015, p. 2059).

A dispersão de um poluente é calculada assumindo-se a dispersão do sopro ou da partícula. No modelo *puff*, os *puffs* se expandem até excederem o tamanho da célula da grade meteorológica (horizontal ou verticalmente) e então se dividem em vários novos *puffs*, cada um com sua parcela da massa poluente. No modelo de partículas, um número fixo de partículas é advectado sobre o domínio do modelo pelo campo de vento médio e espalhado por um componente turbulento. A configuração padrão do modelo assume uma distribuição tridimensional de partículas (latitude, longitude e elevação) (DRAXLER, 2020).

O modelo é continuamente revisado e atualizado, tanto pelas demandas teóricas químico-físico-matemáticas, quanto pela evolução da capacidade computacional. Suas equações são demonstradas no Memorando Técnico (ERL ARL-224) - *HYSPLIT DESCRIPTION OF THE HYSPLIT_4 MODELING SYSTEM* e no artigo de atualização das equações, publicado por Stein *et al.* (2015).

Diversos trabalhos utilizaram o modelo HYSPLIT com uma ferramenta para evidenciar possíveis aportes de massas aéreas ou a dispersão de diversos materiais bióticos e abióticos em áreas urbanas e/ou rurais, nos polos do planeta, em áreas desérticas e ambientes marinhos adotando distintas escalas atmosféricas (MA *et al.*, 2020; DEKA *et al.*, 2015; STEIN *et al.*, 2015).

A aplicação desse modelo em território brasileiro já foi apresentada em distintos contextos, tais como: suporte à decisão aplicada ao processo de tomada de decisão no planejamento de emergência na área de influência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro (SILVA, 2013); em estudo de transporte de poluentes atmosféricos no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no Ceará (COSTA; COSTA, 2021); na execução de simulação numérica da dispersão atmosférica de resíduos gasosos provenientes do aterro comum de Bom Sucesso, na Paraíba (SOUZA, 2018); na análise de controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do Estado de São Paulo (GOMES, 2022); na avaliação da variabilidade espaço-temporal da profundidade ótica de aerossóis nos biomas cerrado e pantanal da região central do Brasil (PALÁCIOS *et al.*, 2018).

O HYSPLIT pode ser executado na *web* através do sistema READY ou pelo programa instalado no computador com sistema operacional Windows ou Mac. Há também opção para instalação no sistema UNIX ou LINUX, porém o código deve ser compilado localmente ou binários pré-compilados devem ser instalados.

A versão instalada registrada é completa sem restrições computacionais, exceto que os usuários devem obter seus próprios arquivos de dados meteorológicos. A versão não registrada

é idêntica à versão registrada, exceto que as concentrações de plumas não podem ser calculadas com arquivos de dados meteorológicos de previsão. O modelo somente de trajetória não tem restrições e as trajetórias de previsão ou de arquivo podem ser calculadas com qualquer uma das versões.

A instalação requer um interpretador de *script* Tcl/Tk para executar a GUI e para gerar os gráficos no formato *Scalable Vector Graphics* (SVG), que permite que esses materiais possam ser exibidos em qualquer navegador. O executável ImageMagick também pode ser instalado, caso haja necessidade de converter o arquivo SVG para outros formatos. Diversos programas podem ser utilizados conjuntamente com o HYSPLIT, tais como: Python; R; SIG (Google Earth, ArcExplorer e MapWindow); MeteoInfo (TrajStat).

Para a elaboração desta tese optou-se por usar a versão não registrada do modelo, demonstrando que existe facilidade de acesso para qualquer Instituição, agentes públicos, órgãos da Sociedade Civil e demais atores que podem estar envolvidos em um evento QBRN.

2.3.3.1.1 *HYSPLIT e a gestão de eventos QBRN*

Parte do texto apresentado neste subitem compõe o artigo intitulado “Gestão de eventos QBRN e a utilização do modelo HYSPLIT: uma revisão integrativa de literatura”, publicado no volume 43, páginas 925-938, da Revista Saúde em Debate (2019) (vide **Apêndice I**). Esta publicação foi um pré-requisito para avaliação da banca de qualificação do Doutorado Acadêmico. Para a tese, a mesma metodologia foi empregada, porém o período de publicação dos artigos foi ampliado até o ano de 2021 (**Apêndice II**).

A descrição dos estudos incluídos na pesquisa bibliográfica encontra-se apresentada no **Quadro 6**. O modelo HYSPLIT foi adotado na Europa (França, Espanha, Ucrânia, Hungria e Alemanha), na Ásia (Japão, China, Índia, Coreia do Sul, Iran e Iraque), na Turquia, que é considerado um país transcontinental (Euro-Ásia) e na América (EUA e Brasil) o que revela sua difusão global. Os principais objetivos de sua utilização estavam associados a análise do transporte, da dispersão e da deposição de material QBRN na atmosfera.

Quadro 6: Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	LOCAL DO ESTUDO	OBJETIVOS	FINALIDADE DO USO DO HYSPLIT
An <i>et al.</i> (2016)	Coréia 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 <i>et al.</i> (2017)	EUA	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)	EUA; 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 <i>et al.</i> (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.
Feyzinejad <i>et al.</i> (2019)	Irã	Visa simular a dispersão atmosférica da usina de Bushehr, utilizando um modelo de dispersão Lagrangiana.	Simular a dispersão e avaliar a dose de exposição da usina em operação normal.
Yang 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.
Hernández-Ceballos <i>et al.</i> (2020)	Espanha	Apresentar uma metodologia para estimar os padrões de transporte atmosférico, dispersão e deposição no solo de partículas radioativas.	Identificar as principais direções de fluxo de ar por meio das trajetórias de massas de ar calculadas pelo modelo.
Hultquist e Cervone (2019)	Japão	Comparar os dados mensurados durante o acidente nuclear de Fukushima pelo Projeto <i>Safecast</i> com o HYSPLIT e um modelo gaussiano.	Simular a liberação nuclear usando dados meteorológicos e de terreno de alta resolução.
Katata <i>et al.</i> (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, MLDP0 e NAME) com as observações utilizando novas estimativas de termo fonte.

Fonte: Elaboração própria.

Continuação do Quadro 6: Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	LOCAL DO ESTUDO	OBJETIVOS	FINALIDADE DO USO DO HYSPLIT
Kaviani, Memarian e Eslami-Kalantari (2021)	Irã	Estudar a simulação de transporte, dispersão e deposição de materiais radioativos liberados em um acidente postulado na Usina Nuclear de Bushehr.	Simular a investigação do acidente postulado na Usina Nuclear de Bushehr.
Leelosy <i>et al.</i> (2017)	Europa	Avaliar o desempenho dos modelos WRF-Chem Eulerian <i>online</i> , 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 <i>online</i> e RAPTOR Lagrangian para a simulação da dispersão da pluma radioativa e a distribuição espacial do I-131 na Europa Central.
Mohammed Saeed <i>et al.</i> (2020)	Iraque	Estudar o impacto radiológico, principalmente os relacionados à saúde humana, de um acidente hipotético em potenciais locais escolhidos para se instalar uma nova usina nuclear.	Simular a dispersão atmosférica das emissões de fissão, auxiliando na avaliação das consequências para a saúde pública de um acidente nuclear hipotético.
Mohammed Saeed <i>et al.</i> (2019)	Iraque	Avaliar o impacto radiológico das operações esperadas da potencial planta de energia nuclear de Baiji de acordo com o cumprimento do requisito de segurança.	Estudar a distribuição espacial da dose de exposição ao redor da central nuclear de acordo com a distância e direção.
Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018)	Irã	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 Schoeppner (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.

Fonte: Elaboração própria.

Continuação do Quadro 6: Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	LOCAL DO ESTUDO	OBJETIVOS	FINALIDADE DO USO DO HYSPLIT
Rolph, Ngan e Draxler (2014)	EUA	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 50 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.
Silva <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (2014)	Europa; Turquia	Simular o transporte e 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.
Skrynyk <i>et al.</i> (2019)	Ucrânia	Simular o transporte atmosférico, dispersão e deposição do céσιο radioativo de Chernobyl em escala regional.	Compreender de forma mais profunda as condições físicas, processos e mecanismos responsáveis pela criação do padrão de deposição extremamente complicado no território da Ucrânia.
Vali <i>et al.</i> (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 depositada na superfície do solo como resultado de uma liberação hipotética de radionuclídeos do RPT, após um cenário de acidente hipotético.
Varga <i>et al.</i> (2019)	Japão	Detectar qualquer liberação de ¹⁴ C do acidente nuclear de Fukushima Dai-ichi.	Analisar as direções do vento, condições meteorológicas e trajetórias de massas de ar, pois estes podem afetar a distribuição das emissões gasosas após o acidente.
Wu <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (2015)	Hungria	Investigar as variações temporais de radionuclídeos descarregados do acidente com usinas nucleares de Fukushima Daiichi, a partir de coletas amostras de aerossóis em Osaka, Japão.	Verificar o transporte direto da massa de ar da área de Fukushima para a cidade de Osaka.

Fonte: Elaboração própria.

Nesta revisão, 13 artigos simularam cenários reais e dez abordaram cenários hipotéticos. Entre as situações reais, Hultquist e Cervone (2019), Varga *et al.* (2019), Katata *et al.* (2015), Wu *et al.* (2015) e Zhang *et al.* (2015) analisaram situações relacionadas ao acidente da Usina Nuclear Fukushima Dai-ichi. Os estudos revelaram a capacidade do modelo HYSPLIT em representar o fenômeno de transporte e dispersão atmosférica, bem como a deposição de substâncias radioativas liberadas durante o acidente na usina, decorrente de um terremoto ocorrido, em 2011, no Japão.

Hultquist e Cervone (2019) utilizaram dados mensurados pelo Projeto *Safecast*, projeto de ciência cidadã que possui como estratégia a coleta de dados por moradores voluntários, e compararam com dados governamentais e com as simulações geradas pelo HYSPLIT e por outro modelo gaussiano. Os dados do projeto se alinharam com as previsões dos MDA e os autores reiteraram que as informações advindas da ciência cidadã podem ser úteis para validar e potencialmente calibrar esses modelos.

Varga *et al.* (2019) buscaram detectar nos anéis das árvores qualquer liberação de ^{14}C referente ao acidente, porém observaram que a contaminação estava relacionada mais aos períodos pré e pós-acidente e a operação de longo prazo da Usina, do que com o acidente em si.

Katata *et al.* (2015) estimaram as variações das liberações atmosféricas de radionuclídeos durante o evento, conseguindo estimar as mais altas taxas de contaminação radioativa nas áreas ao redor da usina. Já Wu *et al.* (2015), além de simularem a transferência direta das massas de ar liberadas de Fukushima, apresentaram dados do programa de monitoramento de radioatividade em partículas atmosféricas da cidade chinesa de Lanzhou, que detectou e mensurou amostras de aerossol.

Zhang *et al.* (2015) avaliaram a variação diária das concentrações de atividade de iodo-131, césio-134 e césio-137 na atmosfera na cidade de Osaka 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 Stein (2015) realizaram um levantamento de dados da concentração de Cs-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.

Dois estudos analisaram aspectos relacionados ao acidente da Usina Nuclear de Chernobyl, ocorrido em 1986. Skrynyk *et al.* (2019) simularam o transporte atmosférico, dispersão e deposição do céσιο radioativo de Chernobyl em escala regional e verificaram que tanto a meteorologia, quanto a parametrização da fonte poluente possuem influência muito significativa no padrão de deposição acumulada de Cs-137 gerada pelo HYSPLIT. Os resultados revelaram que a deposição seca desempenhou um papel significativo na contaminação no território da Ucrânia (com cerca de 50% do total das deposições). Mesmo com algumas situações não claramente elucidadas, os autores afirmaram que o modelo demonstrou um bom desempenho em relação ao cenário analisado.

Simsek *et al.* (2014) utilizaram o HYSPLIT para simular a deposição de céσιο-137 sobre a Turquia, a partir dos dados do Atlas de Céσιο 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.* (2018) avaliaram a capacidade do HYSPLIT em simular a dispersão do radiokrypton-85 liberado por uma usina de reprocessamento de combustível nuclear no noroeste da França. Os resultados demonstraram uma leve tendência de o modelo subestimar as concentrações encontradas, porém ele gerou dados com uma correlação significativa e uma dispersão moderada entre observações e simulações.

Silva *et al.* (2018) também abordaram um cenário de acidente real ao investigarem 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. As simulações demonstraram que embora o acidente tivera um alcance pequeno (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.* (2016) usaram dados dos desastres

nucleares de Chernobyl e de Fukushima 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. Foi verificado que mesmo num raio próximo à usina, a distribuição e os níveis de concentração de césio podem variar de acordo com a mudança das condições meteorológicas, com a topografia da região e com o número de partículas emitidas. Os pesquisadores sinalizaram que a adoção das informações geradas pelo HYSPLIT pode ser profícua perante a formulação de medidas de prevenção eficientes e sistemáticas para desastres nucleares e a obtenção de respostas de emergência contra acidentes de radiação.

Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016) demonstraram os resultados de uma possível explosão na Usina de Reprocessamento de Kalpakkam, na Índia. Os cenários simulados de uma liberação radioativa revelaram que o 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.

Kaviani, Memarian e Eslami-Kalantari (2021) estudaram a simulação de transporte, dispersão e deposição de materiais radioativos liberados em um acidente postulado na Usina Nuclear de Bushehr, no Irã. Os resultados da simulação demonstraram que no período de um mês, a poluição nuclear afetaria quase todo o Irã e contaminaria a maior parte do hemisfério norte. Os materiais poderiam alcançar o hemisfério sul, porém com quantidades insignificantes.

Pirouzmand, Kowsar e Dehghani (2018) também apresentam um estudo de caso da Usina Nuclear de Bushehr, 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 Irã, Vali *et al.* (2018) 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.

No Iraque, Mohammed Saeed *et al.* (2019) avaliaram o impacto radiológico das operações esperadas para uma possível planta de energia nuclear de Baiji. Os resultados demonstraram que o máximo de dose anual equivalente foi equivalente a 0,5 uSv, valor bem abaixo do preconizado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (em inglês, *International Commission on Radiological Protection*). A incidência de câncer e os riscos de fatalidades estavam na faixa de 1:107 pessoas.

Para essa mesma região, Mohammed Saeed *et al.* (2020) estudaram o impacto radiológico de um acidente hipotético em potenciais locais escolhidos para se instalar uma nova usina nuclear. Eles apresentaram uma análise das séries temporais e distribuição espacial de contaminantes radioativos dispersos em caso de acidente, baseados nas especificações geológicas e meteorológicas do local potencial. Foi sinalizado que as regiões situadas a oeste e sudoeste do local necessitam mais de procedimentos de emergência do que as regiões leste e nordeste, consideradas como zona de apoio.

Outros MDA foram comparados com o HYSPLIT (HULTQUIST; CERVONE, 2019; SKRYNYK *et al.*, 2019; LEELÖSSY *et al.*, 2017; AUXIER; AUXIER; HALL, 2017; KATATA *et al.*, 2015).

Katata *et al.* (2015) compararam HYSPLIT, *Zeroth Order Lagrangian Dispersion Model* (MLDP0) e *Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment* (Name) durante o acidente na Usina Nuclear de Fukushima Daiichi, em 2011, e averiguaram concordância dos modelos em relação à concentração aérea de radionuclídeos e à deposição superficial de Cs-137.

Auxier, Auxier e Hall (2017) analisaram 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. 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.

Leelossy *et al.* (2017) reiteraram que o HYSPLIT foi extensivamente aplicado para pesquisa e apoio à decisão no caso do acidente de Fukushima e por esse motivo o empregaram 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. As simulações demonstraram uma dispersão da pluma radiotiva em escala continental, amplamente, dominada pelas características atmosféricas e pela incerteza do vento.

Skrynyk *et al.* (2019) realizaram uma comparação qualitativa entre HYSPLIT e CALPUFF. Eles registraram que o padrão de deposição cumulativa no HYSPLIT foi mais consistente com o padrão de contaminação real e indicaram que traços radioativos, máximos locais e as deposições foram facilmente observados nas simulações do HYSPLIT, enquanto o padrão gerado pelo CALPUFF estava claramente mais suavizado.

Já Rolph, Ngan e Draxler (2014) analisaram o modelo HYSPLIT contra as medidas de precipitação nuclear de seis testes nucleares conduzidos entre 1951 e 1957, em Nevada, nos EUA. O modelo foi capaz de reproduzir os padrões gerais de direção e deposição, porém, as simulações de plumas usando dados meteorológicos do 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).

Yang e Ou (2018) 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. O artigo apresentou que essa integração possui efeitos positivos sobre riscos ambientais, visto a facilidade de acesso à informação, entrega e capacidade de solução.

Todos os artigos avaliados revelaram 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. Segundo Mohammed Saeed *et al.* (2019), o modelo é preferido frente a outros, pois possui uma conformidade aceitável dos resultados simulados com relação as medições *in loco*.

A **Figura 9** 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.

Figura 9: Caracterização dos estudos incluídos na pesquisa.

Fonte: Elaboração própria.

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 (BHAGANAGAR; BHIMIREDDY, 2020; VAN LEUKEN *et al.*, 2016; JAMOLIN *et al.*, 2013; PRINSLOW, 2011).

Bhaganagar e Bhimireddy (2020) rastrearam a pluma de aerossol infectada com SARS-CoV-2 na cidade de Nova York e verificaram que a partir do momento inicial de liberação (após um espirro), o vírus pode se espalhar por até 30 minutos no ar, movendo-se de 1-2 km da fonte

original, dependendo dos fatores climáticos dos dias simulados. Van Leuken *et al.* (2016) realizaram uma revisão acerca do uso de modelagens computacionais e dispersão de bioaerossóis; Jamolin *et al.* (2013) adotaram o HYSPLIT para simular a liberação de esporos de antraz na área metropolitana de Washington. Prisolow (2011) simulou a liberação do vírus ebola em distintas áreas dos EUA.

Todos esses estudos demonstraram as potencialidades e limitações do modelo HYSPLIT frente à simulação de bioaerossóis, porém, não fazem uma leitura profunda entre os seus resultados e a gestão de eventos QBRN.

Dezoito artigos apresentaram características da simulação relacionadas à fase de planejamento. Onze trabalhos estavam potencialmente vinculados à fase de prevenção. Outros quatro trabalhos demonstraram a aplicabilidade do modelo para a fase de resposta e três 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 Oke (1997), 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 km). As escalas espaciais mais empregadas foram a urbana e a global (**Figura 9**).

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 21 dos 23 artigos selecionados. A trajetória do tipo *backward*, cuja principal função é determinar a origem das massas de ar, foi utilizada em 3 estudos.

Quanto à origem dos dados meteorológicos, três grupos de pesquisadores coletaram os dados no próprio local, dois empregaram bases de dados locais, vinte artigos empregaram a base de dados provenientes de bancos meteorológicos (GDAS, WRF e *Reanalysis*), o que demonstra a versatilidade do modelo com relação ao tipo de dado que os usuários podem adotar. Dois estudos não informaram a origem dos dados.

Assim como o publicado por Pereira *et al.* (2019), a atualização desta revisão permitiu reafirmar 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. O novo levantamento nas bases de dados científicas revelou a ampliação do emprego desse

software e reafirmou o HYSPLIT como um recurso tecnológico mundialmente utilizado, principalmente em pesquisas vinculadas às ciências atmosféricas.

Cabe ressaltar, que 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. Porém, este estudo revela a necessidade de ampliar o conhecimento teórico e prático desse modelo, particularmente, em âmbito nacional.

Esses achados corroboraram com a justificativa e relevância técnico-científica desta tese, visto que não foram encontrados estudos que correlacionem o uso do HYSPLIT em eventos de liberação acidental de agentes biológicos.

2.3.3.1.2 *HYSPLIT e a dispersão de agentes biológicos em áreas urbanas*

Conforme apresentado anteriormente, diversos trabalhos utilizaram o modelo HYSPLIT com uma ferramenta para evidenciar possíveis aportes de massas aéreas ou a dispersão de diversos tipos de materiais liberados em eventos QBRN, porém há um hiato com relação aos eventos biológicos acidentais. Dessa forma, para auxiliar nas simulações dos cenários propostos nesta tese, buscou-se reconhecer na literatura científica como se dá a aplicação do HYSPLIT perante a dispersão de agentes biológicos em áreas urbanas. O intuito da revisão foi verificar como as equipes de pesquisa configuram os *inputs* do modelo, como e quais os dados meteorológicos são utilizados, quais são as condições de uso mais prevalentes e as interpretações dos resultados.

Os locais de realização do estudo, os agentes biológicos pesquisados, objetivos e as estratégias metodológicas seguem apresentados no **Quadro 7**.

Quadro 7: Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO	OBJETIVOS	ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS
Apangu <i>et al.</i> (2020)	Worcester e Leicester, Reino Unido	<i>Alternaria</i> (Fungo)	Entender a contribuição relativa de fontes locais versus transporte de longa distância nas concentrações de esporos de <i>Alternaria</i> , com aplicabilidade a <i>Alternaria</i> e outros locais de amostragem de esporos em todo o mundo.	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem utilizando armadilhas Hirst localizadas no topo de dois edifícios (10 e 12 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos de estações próximas aos locais de amostragem; - Mapa de cobertura do solo; - Modelagem de trajetórias e plumas de dispersão usando o HYSPLIT; - Análises estatísticas utilizando R.
Bhaganagar e Bhimireddy (2020)	Nova York, EUA	SARS-CoV-2 (Vírus)	Investigar a teoria de que bolhas flutuantes com partículas cheias de coronavírus liberados pela tosse de pacientes infectados são transportados por processos de turbulência antes de misturar e diluir na atmosfera.	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem com o WRF-ARW para obter condições de vento e estabilidade atmosférica em três resoluções horizontais distintas (36km, 12km e 3km); - Modelagem de plumas de dispersão usando o HYSPLIT com o WRF acoplado.
Bilińska <i>et al.</i> (2019)	Wroclaw (Breslávia), Polônia	<i>Alnus</i> e <i>Corylus</i> (Pólen)	Investigar a variabilidade das concentrações de pólen de <i>Alnus</i> e <i>Corylus</i> em duas estações localizadas na cidade de Wroclaw, Polônia - uma no centro da cidade e outra a 4 km do centro da cidade (parque), comparando as medições dessas estações em relação à meteorologia e cobertura do solo.	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem utilizando armadilhas Hirst localizadas no topo de dois edifícios (15 e 20 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos coletados de uma estação distante 5 m do parque e 4 km do centro da cidade; - O WRF foi utilizado para gerar os dados meteorológicos em três resoluções espaciais distintas (12 km x 12 km; 4 km x 4 km; 1,3 km x 1,3 km); - Simulações das trajetórias executadas no HYSPLIT e mapas de frequência de trajetórias criados com o SIG e pacotes estatísticos do R; - Mapa de cobertura do solo.

Siglas: Sistema de Informação Geográfica (SIG); *Height above ground level* (AGL); *HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT); *Weather Research Forecast Model* (WRF)

Fonte: Elaboração própria.

Continuação - Quadro 7: Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO	OBJETIVOS	ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS
Galveias <i>et al.</i> (2021)	Évora, Portugal	<i>Cupressaceae</i> (Pólen)	Caracterizar a aerobiologia polínica de <i>Cupressaceae</i> em Évora, Sul de Portugal, em 2017 e 2018, em particular a ruptura polínica, e identificar os parâmetros meteorológicos que contribuem para este fenômeno.	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem utilizando armadilhas Hirst localizada no topo de um edifício (10 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica instalada ao lado da armadilha; - Simulações das trajetórias executadas no HYSPLIT.
Monroy-Colina <i>et al.</i> (2020)	Badajoz, Espanha	<i>Olea europaea</i> (Pólen)	Relacionar a fenologia da floração, distribuição das árvores de origem, meteorologia e registros de pólen transportados pelo ar para esta espécie e analisar a possível chegada de massas de ar de áreas distantes durante os dias em que há diferenças entre os picos fenológicos e polínicos.	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem utilizando armadilha Hirst localizada no topo de um edifício (6 m AGL) e análise fenológica; - Dados meteorológicos foram obtidos de uma estação meteorológica a 3,7 km e de uma estação portátil a 2 m da armadilha; - Mapeamento das árvores (contagem e georreferenciamento - SIG).
Olsen <i>et al.</i> (2019)	Copenhague e Viburgo, Dinamarca	<i>Alternaria</i> (Fungo)	Comparar a carga de esporos nos locais estudados, com atenção especial para os dias de alta concentração. Investigar se a época de colheita dos grãos coincide com a principal liberação de esporos, durante as estações do ano. Entender quais áreas de origem podem estar associadas às altas concentrações.	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem utilizando armadilha Hirst localizada no topo de dois edifícios (Copenhague: 15 m AGL; Viburgo: 21 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos das estações próximas do Aeroporto de Copenhague e em Foulum; - Simulações das trajetórias executadas no HYSPLIT.
Qin <i>et al.</i> (2019)	Beijing, China	<i>Artemisia</i> (Pólen)	Identificar as principais vias de transporte e potenciais áreas de origem do pólen de <i>Artemisia</i> em Pequim.	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem em dois pontos distintos (área urbana e área suburbana) com armadilha Hirst a 3 m AGL e análise microscópica; - Dados meteorológicos locais fornecidos por um Centro de Pesquisa da cidade; - Simulações das trajetórias executadas no HYSPLIT; - Cálculo da área de origem potencial usando os modelos de função de contribuição da fonte potencial e de trajetória ponderada de concentração (TrajStat/MeteoInfo).

Siglas: Sistema de Informação Geográfica (SIG); *Height above ground level* (AGL); *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT).

Fonte: Elaboração própria.

Continuação - Quadro 7: Descrição dos artigos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	LOCAL	AGENTE BIOLÓGICO	OBJETIVOS	ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS
Sadys (2017)	Worcester, Reino Unido	<i>Cladosporium</i> (Fungos)	Analisar o impacto do vento local e do fluxo de massa de ar sobre uma área urbana em conexão com o padrão de concentração em conídios de <i>Cladosporium</i> no ar de um local escolhido.	- Amostragem utilizando armadilhas localizadas no topo de um edifício (10 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos coletados de uma estação localizada no mesmo local do amostrador; - Modelagem atmosférica com o HYSPLIT e SIG.
Sadys, Kennedy e Skjøth (2015)	Worcester, Reino Unido	<i>Cladosporium</i> (Fungos)	Analisar o impacto da direção do vento local e do transporte geral de massa de ar na distribuição intradiurna de conídios de <i>Cladosporium</i> durante cinco anos consecutivos.	- Amostragem utilizando armadilhas localizadas no topo de um edifício (10 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos coletados de uma estação localizada no mesmo local da armadilha; - Análise do transporte de massa aérea com o HYSPLIT e SIG; - Cálculo do Índice Fúngico Sazonal e uso de estatísticas circulares (GenStat).
Skjøth <i>et al.</i> (2015)	Worcester, Reino Unido e Wrocław (Breslândia), Polónia	<i>Alnus e Betula</i> (Pólen)	Analisar as áreas de pegada de dois dos mais importantes aeroalérgenos de primavera na Europa: <i>Alnus e Betula</i> .	- Amostragem utilizando armadilhas Hirst no topo de dois edifícios (Worcester: 10 m AGL; Wrocław: 20 m AGL) e análise microscópica; - Dados meteorológicos foram obtidas das estações em Pershore (~13 km de Worcester) e em Wrocław; - Simulações das trajetórias executadas no HYSPLIT e delimitação das áreas de pegada.
Zemmer, Karaca e Ozkaragoz (2012)	Istambul, Turquia	<i>Ambrosia</i> (Pólen)	Relatar e analisar a temporada de pólen de <i>Ambrosia</i> de 2007 em Istambul e explorar a hipótese de potenciais fontes distantes utilizando um sistema de modelagem de trajetória de retorno, seguindo uma contagem bi-horária para discriminar fontes locais de distantes.	- Amostragem utilizando armadilha Hirst no telhado de um prédio a 15 m AGL e análise microscópica; - Simulações das trajetórias executadas no HYSPLIT.

Siglas: Sistema de Informação Geográfica (SIG); *Height above ground level* (AGL); *HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT).

Fonte: Elaboração própria.

Os estudos realizados no continente europeu corresponderam a maioria das publicações analisadas. Dos 11 artigos incluídos na pesquisa, 8 eram europeus, 1 foi realizado na América (EUA) e 1 na Ásia (China), além de mais 1 artigo da Turquia, que é considerado um país euroasiático. Essa profusa publicação europeia provavelmente está relacionada ao aumento da prevalência de patologias respiratórias, principalmente, na época da primavera, decorrente da maior dispersão de pólen e micropartículas associadas. Fato citado nas próprias introduções dos artigos avaliados.

Cinco artigos investigaram a dispersão atmosférica de distintos tipos de pólen (*Alnus*, *Betula*, *Ambrosia*, *Corylus*, *Cupressaceae* e *Olea europaea*). Com relação aos fungos, foram encontrados 4 artigos que estudaram esse tipo de organismo (*Alternaria* e *Cladosporium*). Houve 1 artigo que apresentou a simulação em tempo real do vírus SARS-CoV-2.

Com exceção do artigo que modelou a dispersão do vírus SARS-CoV-2, todas as publicações utilizaram como estratégia metodológica a amostragem com armadilhas do tipo Hirst, modelo Burkard, instaladas no topo de edifícios situados em áreas urbanas, com alturas que variaram de 3 m a 21 m AGL. Posteriormente a esta etapa, as amostras foram processadas e análise se deu por microscopia óptica.

No que tange a obtenção dos dados meteorológicos, 6 estudos empregaram dados advindos de estações próximas aos pontos de amostragem (APANGU *et al.*, 2020; BILIŃSKA *et al.*, 2019; MONROY-COLÍN *et al.*, 2020; OLSEN *et al.*, 2019; QUINN *et al.*, 2018; SKJØTH *et al.*, 2015) e 4 artigos obtiveram os dados de estações portáteis, instaladas perto das armadilhas (GALVEIAS *et al.*, 2021; MONROY-COLÍN *et al.*, 2020; SADYŚ, 2017; SADYŚ; KENNEDY; SKJØTH, 2015). Dois artigos adotaram o modelo WRF (BHAGANAGAR; BHIMIREDDY, 2020; BILIŃSKA *et al.*, 2019; ZEMMER; KARACA; OZKARAGOZ, 2012) utilizaram apenas os dados meteorológicos que podem ser obtidos diretamente pelo HYSPLIT.

A maioria dos trabalhos usou o SIG para georreferenciar as saídas do modelo. Apangu *et al.* (2020) plotaram as trajetórias das massas de ar durante o episódio estudado, além de gerarem mapas de densidade da dispersão e deposição das partículas desse mesmo momento e também analisarem mapas de cobertura do solo a fim de avaliar potenciais áreas fontes de esporos de *Alternaria* no local estudado. Bhaganagar e Bhimireddy (2020) demonstraram a área percorrida pela bolha contendo o vírus SARS-CoV-2 enquanto ela se deslocava no tempo.

Bilińska *et al.* (2019) utilizaram os mapas de frequência de trajetórias associados aos mapas de cobertura do solo para demonstrar a distribuição espacial das espécies *Alnus* e *Corylus*. Galveias *et al.* (2021) elucidaram a ocorrências das trajetórias de massas de ar no período

investigado. Monroy-Colín *et al.* (2020) apresentaram o georreferenciamento das árvores de *Olea europaea* e o mapeamento de fontes de pólen dessa mesma espécie na Península Ibérica. Olsen *et al.* (2019) publicaram os *clusters* das trajetórias de acordo com as concentrações médias diárias de *Alternaria*. Qin *et al.* (2019) exibiram os *clusters* das trajetórias e as áreas de origem potencial calculadas pelos modelos de função de contribuição da fonte potencial e de trajetória ponderada de concentração.

Ainda em relação ao uso de programas SIG, Sadyś (2017) delineou áreas de pegada baseadas na distribuição de frequência das trajetórias de massas de ar registradas durante os dias de alta contagem de esporos de *Cladosporium*. Sadyś, Kennedy e Skjøth (2015) analisando a dispersão desse mesmo fungo, apresentaram a variação anual das trajetórias mostrando o transporte das massas de ar antes de chegar no local de estudo. Skjøth *et al.* (2015) delinearão áreas de pegada das trajetórias para observações de *Alnus* e *Betula* durante a estação polínica das áreas estudadas.

Zemmer, Karaca e Ozkaragoz (2012) apresentaram apenas as saídas das simulações que são geradas pelo próprio HYSPLIT ao modelar a dispersão dos pólenes de *Ambrosia*.

Alguns autores utilizaram na metodologia outros programas, principalmente, para aprofundar as análises estatísticas dos dados amostrados e/ou conjuntamente com os resultados das simulações. Apangu *et al.* (2020), Bhaganagar e Bhimireddy (2020), Bilińska *et al.* (2019) e Monroy-Colín *et al.* (2020) usaram pacotes estatísticos do R, incluindo o *AeRobiology*. Galveias *et al.* (2021) empregaram o programa OriginPro® (*software* de análise de dados e elaboração de gráficos). Sadyś (2017) e Sadyś, Kennedy e Skjøth (2015) usaram estatísticas circulares através do GenStat® (programa estatístico voltado à área da agricultura). Qin *et al.* (2019) calcularam a área de origem potencial usando os modelos de função de contribuição da fonte potencial e de trajetória ponderada de concentração por meio do plugin TrajStat® habilitado no programa MeteoInfo®.

O **Quadro 8** sintetiza as principais configurações inseridas durante o uso do HYSPLIT pelos estudos incluídos na pesquisa.

Quadro 8: Configurações adotadas no uso do modelo HYSPLIT dos estudos incluídos na pesquisa.

REFERÊNCIA (ANO)	MODELAGEM	DADOS METEREOLÓGICOS	ALTURA (metros AGL)	OUTROS <i>INPUTS</i>
Apangu <i>et al.</i> (2020)	Trajatórias (<i>Backward</i>) e Dispersão (<i>Backward</i>)	GDAS 0,5°	Trajatórias: 500 Dispersão: 100	- Trajetórias: 24 h com intervalo de 2 h entre cada trajetória. - Dispersão: Taxa de emissão = 2.500 partículas de 19 µm por 24 h com intervalo de 2 h entre cada pluma; considerando deposição seca e úmida e velocidade de sedimentação dos esporos = 0,55 cm/s.
Bhaganagar e Bhimoreddy (2020)	Dispersão (<i>Forward</i>)	WRF (resolução horizontal de 3 km; topo do modelo a 50 hPa, com um total de 45 níveis verticais, sendo 12 níveis dentro da camada limite planetária). Condições meteorológicas iniciais e de contorno geradas do GFS 0,25°.	2	- Centro da grade com espaçamento de concentração de 0,0001° (~10 m) em latitude. Direções longitudinais com uma camada vertical de 0 a 10 m acima do nível do solo. - Taxa de emissão = 1E7 por hora, liberada por 0,01h; Formato da partícula = esférico; Diâmetro = 0,125 µm; Densidade = 1,7 g cm ⁻³ .
Bilińska <i>et al.</i> (2019)	Trajatórias (<i>Backward</i>)	WRF (resolução horizontal de 1,3 km x 1,3 km e domínios verticais de 35 níveis). Condições meteorológicas iniciais e de contorno geradas do GFS 0,25°.	50 e 1500	- Trajetórias de 72 h com intervalo de 2 h nas duas altitudes analisadas.
Galveias <i>et al.</i> (2021)	Trajatórias (<i>Backward</i>)	GDAS 0,5°	100, 500 e 1000	- Trajetórias calculadas para cada hora dos 4 dias analisados.
Monroy-Colina <i>et al.</i> (2020)	Trajatórias (<i>Backward</i>)	GDAS 0,5°	0 a 4.000	- Trajetórias diárias de 24 h, com o horário de início no pico máximo de pólen (15 h), por dois dias consecutivos.
Olsen <i>et al.</i> (2019)	Trajatórias (<i>Backward</i>)	GDAS 1°	500	- Trajetórias de 48 h, com intervalo de 2 h, no período de 2012 a 2015. - <i>Clusters</i> das trajetórias agrupadas por alta e baixa concentração média diária.

Siglas: Above ground level (AGL); Global Data Assimilation System (GDAS); Global Forecast System Analysis (GFS); Weather Research Forecast Model (WRF).

Fonte: Elaboração própria.

Continuação – Quadro 8: Configurações adotadas no uso do modelo HYSPLIT dos estudos incluídos na pesquisa

REFERÊNCIA (ANO)	MODELAGEM	DADOS METEREOLÓGICOS	ALTURA (metros AGL)	OUTROS INPUTS
Qin <i>et al.</i> (2019)	Trajétórias (<i>Backward</i>)	GDAS 0,5°	500	- Trajetórias geradas diariamente durante a estação do pólen, com intervalos de 3 h e começando em UTC 00:00. - <i>Clusters</i> das trajetórias de 24 h e de 96 h.
Sadys (2017)	Trajétórias (<i>Backward</i>)	GDAS 0,5°	500	- Trajetórias geradas diariamente, com intervalo de 1 h, durante o período do estudo.
Sadys, Kennedy e Skjøth (2015)	Trajétórias (<i>Backward</i>)	GDAS 1°	500	- Trajetórias geradas diariamente, com intervalo de 1 h, durante o período do estudo.
Skjøth <i>et al.</i> (2015)	Trajétórias (<i>Backward</i>)	GDAS 1°	500	- Trajetórias de 96 horas, com intervalo de 2 h, no período de 2005 a 2014. - <i>Clusters</i> para construção dos mapas de área de pegada.
Zemmer, Karaca e Ozkaragoz (2012)	Trajétórias (<i>Backward</i>)	GDAS 1°	100	- Trajetórias de 72 h em 1 episódio que apresentou a contagem mais alta de pólen nos períodos da manhã e da noite - Mapa de distribuição de frequências de trajetórias durante a temporada da <i>Ambrosia</i> .

Sigla: *Global Data Assimilation System* (GDAS).

Fonte: Elaboração própria.

Todas as trajetórias executadas empregaram a categoria *backward* para a variável direção, ou seja, trajetórias que podem potencialmente chegar à fonte receptora.

A dispersão simulada por Apangu *et al.* (2020) também adotou o tipo *backward*, a fim de verificar se os esporos de *Alternaria* liberados de suas diferentes fontes foram dispersos e depositados nos locais de amostragem. Bhaganagar e Bhimireddy (2020) usaram a direção *forward*, já que o intuito foi verificar até onde a bolha com partículas virais pode viajar e com que rapidez ela se espalha na atmosfera.

Para a simulação no modelo HYSPLIT, a entrada de dados meteorológicos foi mais frequente a partir da inserção de dados provenientes dos bancos GDAS 0,5° (APANGU *et al.*, 2020; GALVEIAS *et al.*, 2021; MONROY-COLÍN *et al.*, 2020; QIN *et al.*, 2019; SADYŚ, 2017) e GDAS 1° (OLSEN *et al.*, 2019; SADYŚ; KENNEDY; SKJØTH, 2015; SKJØTH *et al.*, 2015; ZEMMER; KARACA; OZKARAGOZ, 2012). Dois artigos usaram o banco WRF e associaram o GFS 0,25° para criar as condições meteorológicas iniciais e de contorno (BHAGANAGAR; BHIMIREDDY, 2020; BILIŃSKA *et al.*, 2019).

A altura da fonte emissora ou receptora variou de 0 a 4.000 m AGL. Olsen *et al.* (2019) afirmam que a altura do receptor de 500 m AGL, no GDAS 1°, é tipicamente usado em estudos aerobiológicos e Sadys, Kennedy e Skjøth (2015) sinalizam que é recomendado usar uma altura de receptor de 200 a 1,000 m para simular o transporte global na CLP. Zemmer, Karaca e Ozkaragoz (2012) relatam que o HYSPLIT é capaz de calcular qualquer valor de profundidade de mistura, camada atmosférica acima do solo, onde ocorrem turbulências e partículas atmosféricas são misturadas, juntamente com as trajetórias.

Pode-se verificar que a duração das trajetórias e os intervalos para execução de cada trajetória variaram conforme o objetivo ou fenômeno investigado. A duração de trajetória mais curta foi de 24 h com intervalo horário e a mais longa foi de 96 h, também com intervalo horário. Zemmer, Karaca e Ozkaragoz (2012) registraram que as trajetórias *backward* de múltiplos eventos durante um longo período permitem uma análise estatística dos dados e o subsequente aumento da precisão do modelo.

Na simulação das dispersões, Apangu *et al.* (2020) adotaram um tempo de liberação de 24 h. Já Bhaganagar e Bhimireddy (2020) simularam a liberação de acordo com a duração da tosse/espirro (~ 36 segundos). Esses autores também demonstraram a capacidade do modelo ao poderem especificar as configurações das variáveis taxa de emissão, deposição seca e úmida, velocidade de sedimentação e forma, diâmetro e densidade da partícula. Segundo Apangu *et al.* (2020) a velocidade de sedimentação dos pólenes e dos esporos desempenha um papel

importante na sua dispersão e deposição, se tornando uma informação importante nas modelagens.

Olsen *et al.* (2019), Qin *et al.* (2019) e Skjøth *et al.* (2015) além de simular as trajetórias, as agruparam em *clusters*, pois segundo os autores, essa abordagem reduz as incertezas associada a qualidade limitada dos dados meteorológicos e ao cálculo das trajetórias.

Com relação aos resultados dos estudos, Apangu *et al.* (2020) inferiram que as massas de ar chegaram a Leicester e a Worcester, no Reino Unido, provenientes da Irlanda e do Oceano Atlântico, revelando a probabilidade da contribuição do transporte de longa distância dos esporos de *Alternaria* de forma discreta, porém equivalente para ambos os locais. Além disso, demonstraram que as simulações no HYSPLIT indicaram a dispersão e a deposição desses esporos a partir de fontes locais.

Bhaganagar e Bhimireddy (2020) ao proporem o rastreamento da pluma de aerossol infectada em tempo real verificaram que situações de baixas velocidades de vento, turbulência de baixo nível e condições de solo úmido e fresco favorecem a transmissão de partículas virais. A partir do momento de liberação, as simulações resultaram num espalhamento de até 30 minutos, percorrendo um raio de 200 m de cada vez, podendo atingir locais de até 2 km de distância da fonte emissora.

Bilińska *et al.* (2019) evidenciaram a possibilidade de alta variação da concentração do pólen mesmo em locais de amostragem próximos (cerca de 4 km) e indicaram a contribuição dos fatores meteorológicos e a influência do transporte aéreo nessa variabilidade polínica.

Galveias *et al.* (2021) sugeriram que umidade relativa do ar, a chuva e precipitação e pressão atmosférica são os principais fatores que afetam a integridade do pólen de *Cupressaceae* no ar e, em conjunto com a concentração diária de pólen, podem ser usados para prever o risco de surtos de alergia a esse tipo de pólen.

Monroy-Colín *et al.* (2020) apresentaram que a análise das fontes e dos registros polínicos de *Olea europaea* possuem uma estreita relação com os ventos predominantes e a distribuição das árvores. Segundo os autores, as discrepâncias observadas entre os dados fenológicos e aerobiológicos podem ser explicadas pela movimentação de massas de ar e transporte de longa distância. Os pesquisadores apontaram a utilidade do HYSPLIT frente a compreensão completa dessas discrepâncias, pois o modelo fornece informações detalhadas sobre os caminhos percorridos pelas massas de ar até sua chegada a área de estudo, sendo uma ferramenta útil para uma série de aplicações científicas relacionadas à análise da qualidade do ar.

Olsen *et al.* (2019) sinalizaram que seus resultados sustentam a hipótese de que fontes locais causam a principal carga de concentrações de esporos de *Alternaria* no ar da Dinamarca, porém ainda desconhecem a real contribuição de origens remotas, tais como: o norte da Alemanha, Polônia e Sul da Suécia. Eles também relataram a relevância das análises de trajetórias de massas de ar em combinação com mapas de área de fonte potencial na pesquisa aerobiológica.

Qin *et al.* (2019) mostraram diferenças significativas na concentração de pólen de *Artemisia* em Pequim, atribuídas a diferenças na distribuição de plantas e altitude dos locais amostrados. As diferenças foram observadas na emissão de pólen, nos movimentos da massa de ar e na dispersão do pólen. As áreas de origem situaram-se tanto em escala local ou regional, quanto em escala de longo alcance.

Sadys (2017) demonstraram maiores concentrações de esporos, quando o *Cladosporium* esporula (julho e agosto). Além disso, afirmam que as fontes de conídios devem ser originárias do próprio Reino Unido, com impacto maior do vento local. Anteriormente, outro trabalho desenvolvido na mesma cidade e envolvendo esse mesmo fungo, observou que os esporos tinham origem regional (SADYS, KENNEDY e SKJØTH, 2015).

Skjøth *et al.* (2015) anunciaram diferenças substanciais na sazonalidade, nos índices de pólen de *Alnus* e *Betula* e nas áreas de pegada entre Worcester e Wrocław. As razões parecem estar relacionadas às diferenças no clima geral e à existência de fontes mais abundantes na Polônia do que na Inglaterra. As áreas de pegada sugerem que a fonte dos grãos de pólen são principalmente árvores locais, mas parecem ser aumentadas por fontes remotas, como por exemplo: Alemanha, Holanda e Bélgica.

Zemmer, Karaca e Ozkaragoz (2012) fornecem evidências de que os pólenes de *Ambrosia* detectados derivam de origens locais (província de Istambul e a Trácia turca) e remotas (Ucrânia, a região costeira russa do Mar Negro e a Moldávia) combinadas. Os autores apontam a importância dos estudos aerobiológicos, pois estes podem indicar a presença de uma espécie em uma região antes que a planta seja realmente encontrada.

Esta revisão possibilitou verificar que o uso de modelos atmosféricos é relevante tanto para a mitigação quanto para a previsão de eventos envolvendo a dispersão de agentes biológicos. O HYSPLIT demonstrou ser um modelo capaz de estimar as direções tomadas pelas massas de ar, identificar as fontes e fenômenos de dispersão locais, regionais e de longa distância. Dessa forma, ele possui grande potencial para ser utilizado no contexto urbano proposto pela tese.

2.3.3.2 Modelo WRF

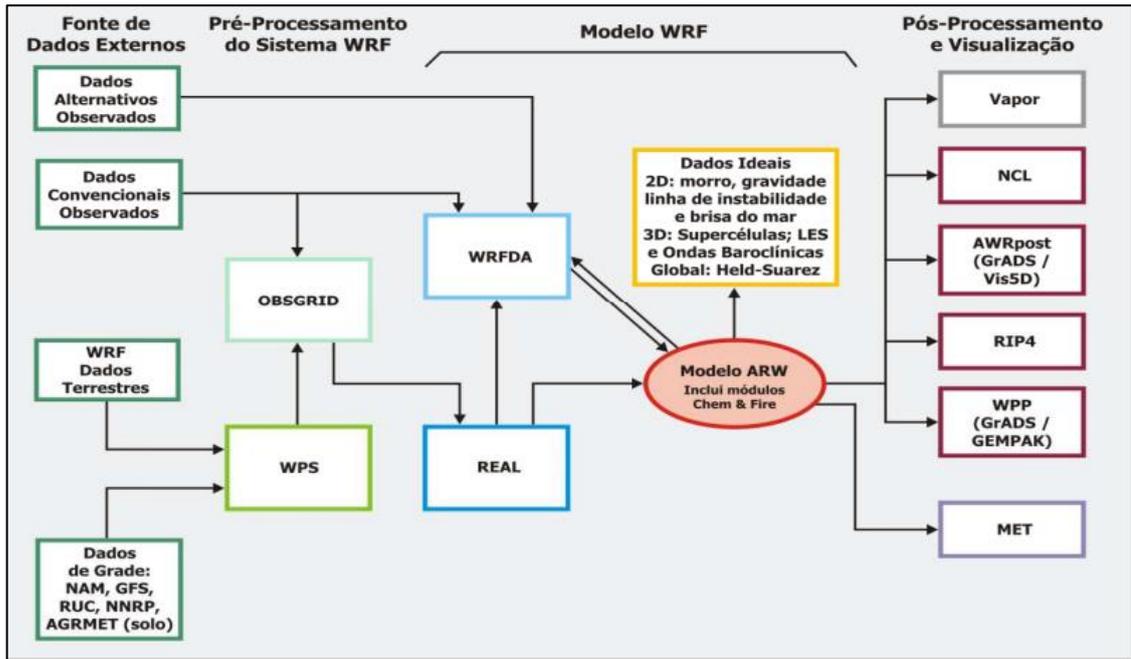
O modelo WRF (*Weather Research and Forecast*) é um sistema de previsão meteorológica numérica de mesoescala de última geração projetado para aplicações de pesquisa atmosférica e previsão operacional (NCAR, 2022; SKAMAROCK *et al.*, 2021). Atualmente é uma ferramenta gratuita difundida em todo o mundo, com uma comunidade de aproximadamente 60.000 usuários cadastrados. Foi desenvolvido com a colaboração de diversos centros de pesquisa, tais como: NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), MMM (*Mesoscale and Microscale Meteorology*), NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration's*), FSL (*Forecast Systems Laboratory*), AFWA (*Air Force Weather Agency*), NRL (*Naval Research Laboratory*), *University of Oklahoma*) e FAA (*Federal Aviation Administration*) (HACKEROTT, 2013).

Ele atende a uma ampla gama de aplicações meteorológicas em escalas de dezenas de metros a milhares de quilômetros, que incluem previsões numéricas do tempo operacionais e voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, modelos dirigidos de qualidade do ar, acoplamento oceano-atmosfera e simulações idealizadas (como por exemplo: ondas baroclínicas, convecção) (OLIVEIRA, 2006).

Esse código resolve um conjunto de equações modelando o estado e evolução da atmosfera, incluindo conservação da quantidade de movimento, termodinâmica conservação de energia, conservação de massa, relação geopotencial e a equação de estado. Também parametriza diversos processos físicos, tais como: radiação de ondas curtas e longas, transferência, modelagem de superfície, turbulência, convecção cumulus, microfísica de nuvens e precipitação (ALMEIDA *et al.*, 2020).

O WRF oferece uma plataforma flexível e computacionalmente eficiente de previsão operacional, ao mesmo tempo em que reflete os recentes avanços em física, numérica e assimilação de dados contribuídos por desenvolvedores da ampla comunidade de pesquisa (NCAR, 2022). Possui dois núcleos dinâmicos, um sistema de assimilação de dados e uma arquitetura de *software* que suporta computação paralela e extensibilidade do sistema (**Figura 10**) (SKAMAROCK *et al.*, 2021).

Figura 10: Fluxograma do Sistema de Modelagem *Weather Research and Forecast* (WRF).



Fonte: Silva (2013).

O código do WRF é aberto e foi desenvolvido para ser flexível, portátil e eficiente em ambientes de computação paralela. Pode produzir simulações baseadas em condições atmosféricas reais ou condições idealizadas (SILVA, 2013). Além disso, permite a utilização de diferentes grades aninhadas, é possível obter dados de uma área específica com uma alta resolução espacial, sem que todo o domínio computacional tenha que ser processado com um espaçamento de grade muito pequeno (CARVALHO, 2015).

O modelo WRF é amplamente utilizado em estudos que avaliam aspectos meteorológicos, como mudanças climáticas, previsão do tempo, radiação, precipitação (GIANNAROS *et al.*, 2023; BERIO FORTINI *et al.*, 2022; PERINI DE SOUZA *et al.*, 2022; HAMMES, 2022; SOUSA *et al.*, 2019; ALVES, 2019; SEIDE, 2019; HACKEROTT, 2013). Além de também ser adotado em pesquisas que analisam a dispersão atmosférica de poluentes ambientais e/ou de agentes biológicos e a ocorrência de desastres (LI *et al.*, 2023; MA; ZHAO; WEI, 2022; FANG *et al.*, 2022; BHAGANAGAR; BHIMIREDDY, 2020; FEYZINEJAD *et al.*, 2019; HERNÁNDEZ-CEBALLOS *et al.*, 2014; SILVA, 2013).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a utilização do modelo computacional de dispersão atmosférica HYSPLIT como potencial ferramenta de gestão frente a cenários de liberação acidental de *Bacillus anthracis*.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Simular cenários de liberação acidental de *Bacillus anthracis* na área de estudo a partir do modelo HYSPLIT acoplado ao modelo GFS 0,25°;
- 2) Comparar as simulações executadas no modelo HYSPLIT-GFS 0,25° com as simulações oriundas do modelo HYSPLIT acoplado ao modelo WRF 1 km;
- 3) Elencar as potencialidades e limitações do modelo HYSPLIT frente ao contexto estudado;
- 4) Identificar as possíveis contribuições do modelo HYSPLIT para cada etapa da gestão de eventos envolvendo a liberação acidental de *Bacillus anthracis*.

4 METODOLOGIA

4.1 TIPO DE PESQUISA

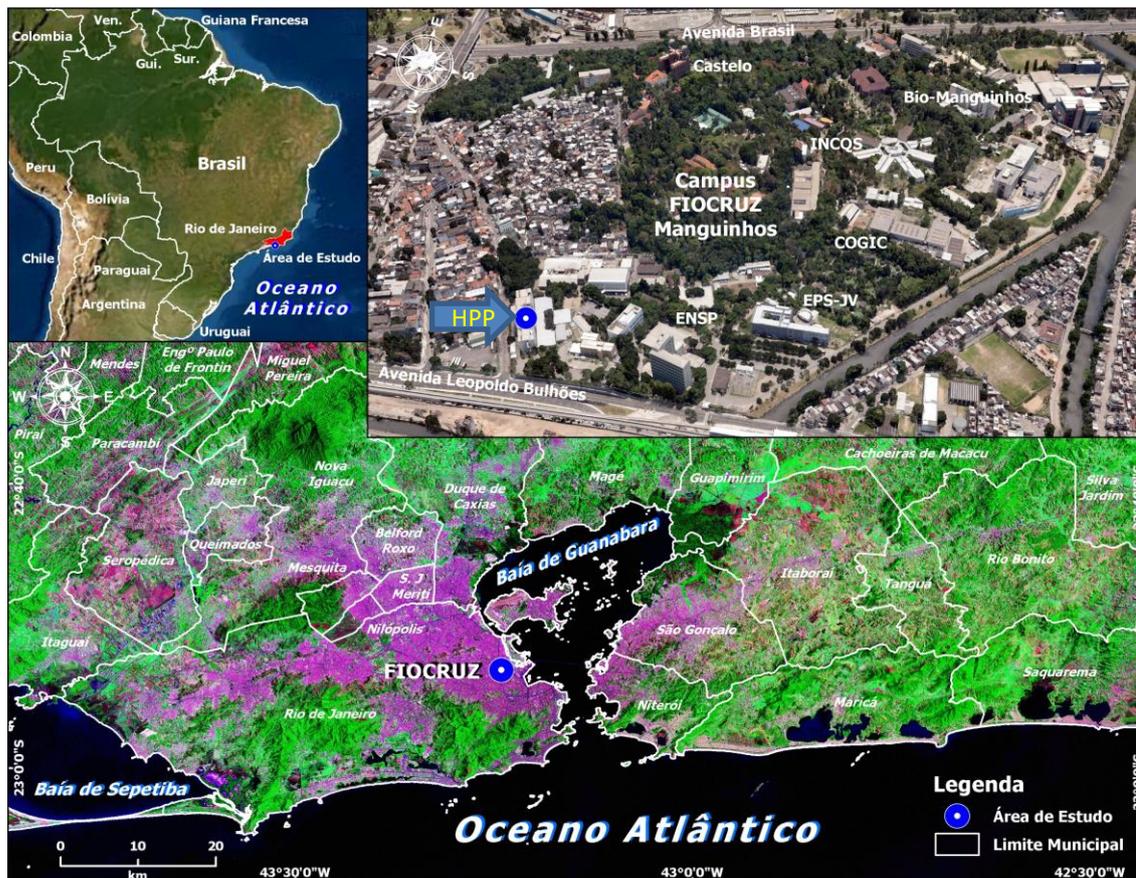
De acordo com Prodanov e Freitas (2013) este estudo caracterizou-se, quanto à finalidade, como uma pesquisa aplicada ou tecnológica, pois objetivou gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Quanto aos seus objetivos, pode ser considerado como: (a) uma pesquisa exploratória, por buscar conhecer mais informações sobre o tema. Este tipo de pesquisa possui planejamento flexível, o que permite o estudo do tema sob diversos ângulos e aspectos. (b) pesquisa descritiva, pois visou descrever as características de determinado fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Tal tipo de pesquisa observa, registra, analisa e ordena dados, sem interferência do pesquisador.

Em relação aos procedimentos técnicos, segundo Fontelles *et al.* (2009), a tese pode ser classificada como uma pesquisa bibliográfica e documental, pois utilizou diversos tipos de materiais publicados, seja no contexto científico ou por diferentes órgãos nacionais e internacionais. E quanto à sua forma de abordagem, tipifica a abordagem quali-quantitativa, pois utilizou técnicas matemáticas e computacionais para descrever o funcionamento de um sistema ou de parte de um sistema produtivo, a partir de modelos. Além de analisar o contexto apresentado nas produções técnico-científicas do tema estudado.

4.2 UNIVERSO DA PESQUISA: PLATAFORMA NB3 DO IOC, CAMPUS FIOCRUZ/MANGUINHOS

No presente estudo, o local utilizado como cenário das simulações foi a plataforma de NB3 pertencente ao IOC/FIOCRUZ. Esta plataforma localiza-se no Pavilhão HPP, no *campus* sede da FIOCRUZ, situado no Bairro de Manguinhos, zona norte da capital do Estado do Rio de Janeiro, na região sudeste do Brasil (**Figura 11**).

Figura 11: Localização da área de estudo – Plataforma Nível de Biossegurança 3 do Instituto Oswaldo Cruz, Pavilhão Hélio Peggy Pereira (HPP), Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.



Fonte: Elaboração própria - Software ArcGIS (2022).

Esta plataforma foi escolhida como local hipotético da fonte de emissão, pois é nela que os pesquisadores do IOC, vinculados ao Laboratório de Fisiologia Bacteriana, e ao Laboratório de Referência Nacional para Carbúnculo realizam experimentos ou manipulam amostras contendo antraz.

Além disso, no Pavilhão HPP também fica situado o Laboratório de Vírus Respiratório e Sarampo que em 2015 recebeu amostras para teste diagnóstico de um paciente com suspeita de ebola internado no Instituto Nacional de Infectologia Evandro Chagas (INI/FIOCRUZ) (FIOCRUZ, 2015) e durante a pandemia da COVID-19, foi considerado pela OMS como uma das referências nas Américas, nas áreas de pesquisa e diagnósticos. Dessa forma, este Pavilhão é considerado um local estratégico para a FIOCRUZ.

Outra característica relevante é que no entorno desse *campus* há uma elevada concentração de pessoas, que habitam três grandes comunidades da região, o Complexo de Manguinhos, o Complexo da Maré e o Jacaré. O *campus* também está próximo de importantes eixos viários da cidade, como a Avenida Brasil, a Linha Amarela, a Avenida Dom Helder Câmara e a Rua Leopoldo Bulhões.

Esta área é reconhecidamente um ambiente de extrema vulnerabilidade. Registra um dos maiores índices de criminalidade e está entre as piores localidades no *ranking* do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do município (CARVALHO, 2020). Grande parte de sua extensão é classificada, pelo IBGE, como “subnormal” (IBGE, 2010). Seu cotidiano é marcado pelo violento controle social, pela violação de diversos direitos, pela dificuldade no acesso a bens, infraestrutura e serviços, bem como a criminalização do território (PEREIRA, 2013; LIMA; BUENO, 2010).

4.2.1 Condições Meteorológicas da Área de Estudo

A cidade do Rio de Janeiro apresenta clima tropical, com a estação chuvosa durante o verão e estação seca durante o inverno. No período primavera/verão os eventos chuvosos ocorrem preferencialmente entre a tarde e a madrugada, influenciados pelo aquecimento local e intensificados pela brisa marítima. No período outono/inverno a chuva ocorre a qualquer hora do dia, geralmente devido à penetração dos sistemas frontais. A umidade relativa do ar, geralmente, se mantém acima do 70% no decorrer das estações (SMAC, 2018).

A cidade desenvolveu-se ao redor do Maciço da Tijuca, que a divide em “Zona Norte” e “Zona Sul”. O relevo acidentado e diversificado da cidade, com mais dois maciços, Gericinó-Mendanha ao norte e da Pedra Branca à oeste influenciam o padrão de vento. Ademais a proximidade com o oceano é um fator determinante para o comportamento do mecanismo de brisa observado no município. De acordo com (PIMENTEL *et al.*, 2014), as composições em diferentes períodos ao longo do dia demonstram as peculiaridades do ciclo diurno na direção e intensidade dos ventos. Estes aspectos evidenciam a importância dos processos que envolvem o oceano e o continente na determinação do campo de vento.

A radiação solar apresenta um ciclo diurno bem definido. A incidência de radiação solar aumenta gradativamente ao longo do dia, atingindo nível máximo no período da tarde (SMAC, 2018).

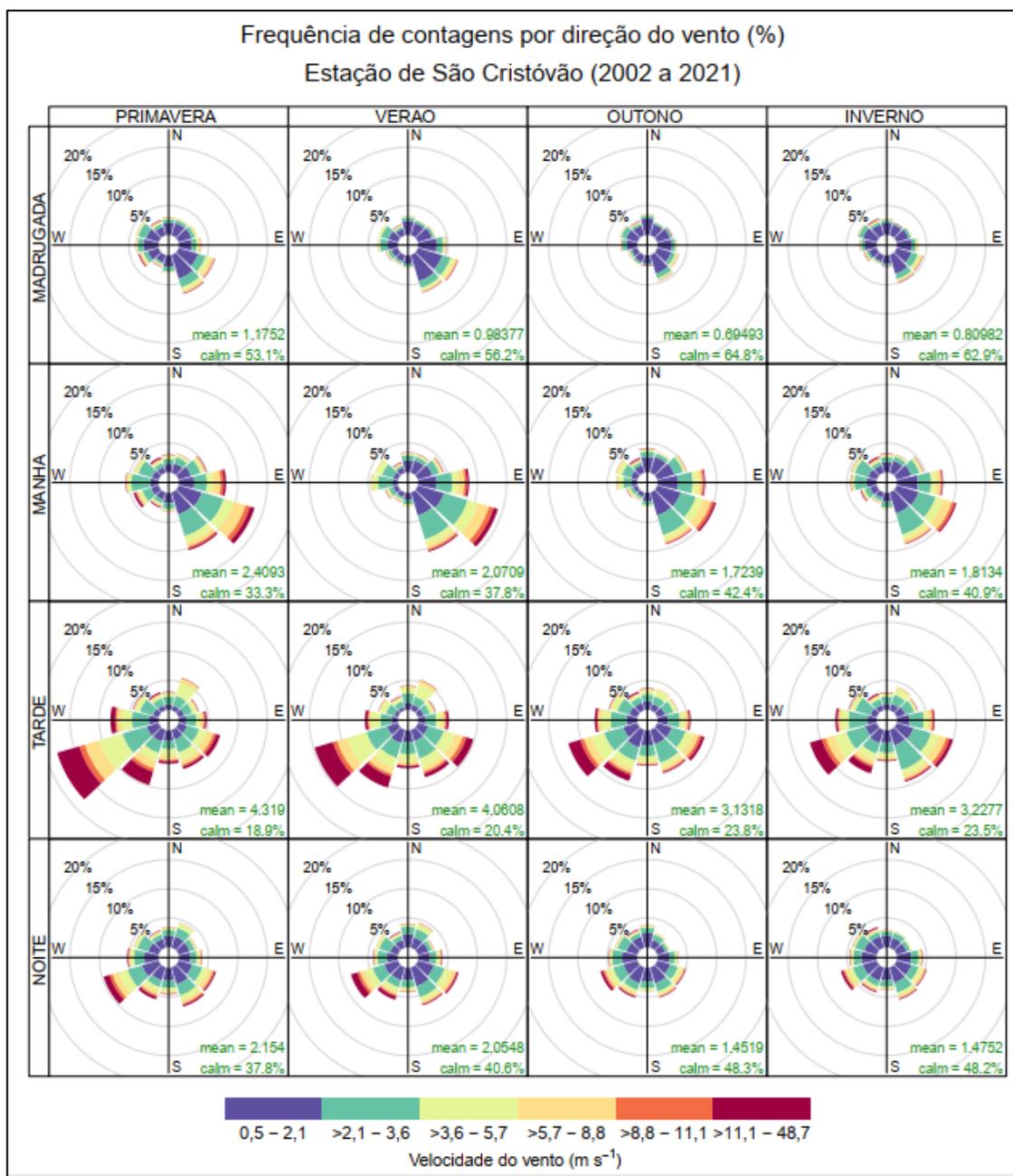
Próxima ao campus da FIOCRUZ-Manguinhos (~3 km) existe uma estação fixa automática situada no Bairro de São Cristóvão (EASC), Zona Norte do Município do Rio de Janeiro, sudeste brasileiro. Essa estação compõem a Rede de Estações do Programa MonitorAr-Rio, operada pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Suas coordenadas geográficas são 22,89667S 43,22167W e possui cota equivalente a 25 m. Carvalho (2020) também utilizou os dados desta estação para analisar a contaminação do solo da região de Manguinhos por

hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.

Segundo a Secretaria de Meio Ambiente (2018), tanto o bairro de São Cristovão, quanto Manguinhos possuem áreas de baixada resultantes de aterros da orla, cobertura vegetal semelhantes e são amplamente ocupadas por áreas antrópicas, com grande diversidade de usos, incluindo indústrias, áreas de vulnerabilidade socioambiental e importantes eixos viários.

Os dados meteorológicos disponíveis relativos à predominância da direção e intensidade dos ventos, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar estão apresentados na **Figura 12** e nas **Tabelas 1 a 4**.

Figura 12: Predominância de direção e intensidade dos ventos por estação e período do dia, de 2002 a 2021, da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.



Fonte: Elaboração própria – *Software RStudio*

Tabela 1: Precipitação total mensal (mm) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.

PERÍODO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2002	149	141	29	10	76	46	10	20	66	31	19	27	624
2003	234	5	142	71	72	23	54	185	27	262	196	138	1409
2004	172	201	59	99	67	42	205	30	22	137	181	185	1400
2005	199	16	185	120	103	55	145	19	194	109	143	228	1516
2006	166	85	58	92	129	72	71	33	117	123	198	107	1251
2007	189	84	19	57	114	64	85	13	31	151	202	202	1211
2008	184	179	229	221	65	68	16	79	144	99	194	228	1706
2009	282	81	104	139	50	56	106	67	82	206	99	321	1593
2010	93	50	239	235	68	55	103	60	76	124	104	191	1398
2011	145	50	159	118	150	68	24	40	38	185	132	194	1303
2012	211	35	96	91	168	118	38	16	98	74	157	-	1102
2013	277	75	205	82	93	31	139	16	85	80	198	135	1416
2014	27	28	112	136	50	73	114	29	64	31	106	54	824
2015	49	86	95	63	52	96	25	3	134	24	168	87	882
2016	220	105	69	17	90	89	-	69	64	105	250	108	1186
2017	60	36	121	172	59	99	40	106	29	86	124	66	998
2018	209	137	87	62	33	36	33	130	54	132	226	56	1195
2019	33	203	198	128	110	69	28	93	161	75	139	103	1340
2020	144	265	328	41	124	21	78	110	138	100	151	258	1758
2021	52	113	40	135	90	29	27	102	54	242	266	208	1358
TOTAL	3095	1975	2574	2089	1763	1210	1341	1220	1678	2376	3253	2896	25470

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2: Quantidade de dias de chuva (dias) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.

PERÍODO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2002	16	13	5	2	5	3	4	2	5	4	4	3	66
2003	21	3	13	7	8	4	9	14	4	14	17	15	129
2004	12	17	12	8	9	6	14	7	3	12	13	14	127
2005	16	4	16	12	8	3	8	3	15	12	15	16	128
2006	14	16	9	10	14	11	5	6	12	10	18	10	135
2007	19	6	4	6	10	4	7	3	4	7	13	12	95
2008	14	17	13	15	8	9	3	7	12	13	19	16	146
2009	20	8	13	14	7	8	11	7	12	20	9	19	148
2010	11	4	15	12	8	7	8	7	7	15	15	20	129
2011	13	4	13	10	12	11	4	8	4	13	11	18	121
2012	17	5	12	12	10	12	5	4	8	9	15	-	109
2013	19	8	20	9	12	5	12	4	8	9	13	13	132
2014	3	4	11	12	9	8	9	4	6	7	13	7	93
2015	6	11	15	9	10	11	5	2	11	6	16	12	114
2016	15	11	11	2	10	8	5	10	9	11	14	13	119
2017	14	6	14	15	4	8	5	10	2	8	11	9	106
2018	14	12	9	9	6	6	5	9	12	14	12	4	112
2019	3	17	17	5	7	9	5	11	13	7	12	10	116
2020	15	18	12	8	7	3	5	6	6	12	15	16	123
2021	8	11	6	16	6	7	3	7	8	19	12	16	119
TOTAL	270	195	240	193	170	143	132	131	161	222	267	243	2367

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3: Média mensal de temperatura (°C) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.

PERÍODO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2002	26,2	25,6	27,2	26,1	21,7	21,9	20,8	23,4	21,3	24,6	28,1	26,0	24,7
2003	26,8	29,2	26,6	25,5	22,7	23,0	21,9	20,6	21,8	23,1	25,1	26,5	24,4
2004	26,1	25,9	25,6	25,8	22,5	21,3	20,7	21,3	23,7	22,8	24,8	25,4	23,9
2005	26,7	26,0	27,2	26,2	24,1	22,9	20,9	23,7	21,7	25,1	24,3	25,3	24,5
2006	27,6	28,9	27,5	25,0	21,8	21,5	21,9	22,7	21,7	22,9	23,8	26,1	24,2
2007	25,9	27,6	28,2	26,1	22,4	22,0	21,2	21,2	22,3	23,2	21,1	26,0	23,8
2008	26,3	26,9	26,7	25,8	23,3	22,5	22,2	23,9	22,6	24,9	24,3	25,3	24,6
2009	27,3	28,7	28,1	25,7	24,4	21,7	23,2	22,8	24,6	24,1	28,9	26,8	25,5
2010	29,6	30,0	27,3	25,3	23,6	21,3	22,9	22,0	23,5	23,3	25,1	27,6	25,1
2011	29,0	29,4	26,0	26,3	22,6	21,4	21,6	23,1	22,0	24,1	23,5	25,8	24,6
2012	26,5	28,9	26,9	25,8	22,8	23,4	22,2	22,9	23,8	26,0	24,4	-	25,0
2013	26,7	28,8	26,7	24,9	23,6	23,5	21,5	22,6	24,0	24,2	25,3	26,7	24,8
2014	29,8	29,7	27,7	25,2	23,8	23,4	22,0	22,5	24,3	24,8	25,9	28,5	25,6
2015	30,2	28,9	27,1	25,5	23,8	23,0	23,6	23,9	24,7	25,7	26,4	28,7	25,9
2016	27,3	29,2	28,0	27,9	23,4	20,9	22,5	23,0	23,5	24,3	25,2	27,6	25,2
2017	29,6	28,9	27,0	24,9	23,3	22,8	21,5	21,6	24,5	25,8	25,5	26,7	25,1
2018	28,0	27,1	28,0	25,9	23,8	23,1	23,2	21,9	24,0	24,5	25,8	27,6	25,2
2019	30,5	28,2	27,5	27,0	25,3	24,1	22,3	22,0	23,6	25,7	25,0	26,8	25,6
2020	27,6	27,0	25,5	24,9	23,1	23,7	23,2	22,6	25,4	26,1	24,2	27,1	25,0
2021	29,0	27,3	28,0	24,7	23,3	22,3	20,7	22,5	24,0	22,9	23,8	25,8	24,5
TOTAL	27,8	28,1	27,1	25,7	23,3	22,5	22,1	22,5	23,4	24,4	24,9	26,6	24,9

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4: Umidade relativa média (%) da estação automática do Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil.

PERÍODO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2002	72	73	65	67	74	74	69	65	71	68	64	69	70
2003	72	61	70	70	69	70	65	69	70	70	68	69	69
2004	69	72	69	71	71	68	70	69	66	69	65	70	69
2005	70	68	70	70	69	68	71	64	72	69	68	65	69
2006	64	67	69	71	73	77	72	75	73	70	71	67	70
2007	68	63	62	68	76	75	75	73	71	68	68	66	70
2008	69	74	74	76	73	75	71	71	73	73	78	77	74
2009	76	72	71	72	72	74	76	71	72	78	68	77	73
2010	68	63	74	76	74	73	72	68	69	71	73	75	72
2011	69	63	78	75	75	73	72	69	68	71	72	73	72
2012	73	63	71	75	75	83	73	68	65	65	76	-	71
2013	74	68	75	72	71	74	73	67	66	69	70	72	71
2014	61	57	67	72	70	72	71	67	64	63	67	62	66
2015	59	65	72	70	70	70	69	63	70	67	74	65	68
2016	72	66	70	65	72	73	66	65	69	70	69	66	69
2017	65	61	68	72	70	72	69	69	60	63	63	69	67
2018	68	71	70	69	69	72	70	72	68	72	69	65	70
2019	60	68	72	69	72	69	65	69	72	67	70	69	68
2020	68	73	73	69	69	67	64	66	69	66	71	72	69
2021	61	69	66	68	70	72	66	67	69	76	71	71	69
TOTAL	68	67	71	71	72	72	70	68	69	69	70	69	70

Fonte: Elaboração própria.

A análise das rosas dos ventos revelou que os ventos predominantes na região estudada são oriundos de sudeste e sudoeste e que há uma grande variação na intensidade dos ventos de acordo com o período do dia. As maiores porcentagens de ventos superiores a 11,1 m/s foram contabilizadas nas tardes, principalmente das estações primavera e verão. Já as maiores porcentagens de calmaria foram observadas nas madrugadas, independente da estação do ano (**Figura 11**).

Dereczynski, Oliveira e Machado (2009) afirmaram que na primavera e verão há uma intensificação do gradiente horizontal de temperatura resultante do aumento do aquecimento diferenciado entre continente e oceano, o que induzi o aumento na circulação da brisa marítima. Os achados de Pimentel *et al.* (2014) também confirmam esse perfil ao analisar os regimes de vento das estações meteorológicas localizadas na borda oeste da Baía de Guanabara (Aeroporto Santos Dumont – SBRJ, Centro e Aeroporto do Galeão-SBGL), justificando o padrão dos ventos da região pela proximidade com o contorno da costa.

Com relação ao perfil pluviométrico, os meses que apresentaram maior precipitação total foram novembro (3253 mm) e janeiro (3095 mm). Esses meses também contabilizaram a maior quantidade de dias de chuva, em janeiro choveu 270 dias e em novembro, 267 dias. Os meses menos chuvosos foram junho (1210 mm) e agosto (1220 mm) e com os meses com menos dias de chuva foram julho e agosto, 132 dias e 131 dias, respectivamente (**Tabelas 1 e 2**). Esses achados foram compatíveis com as análises realizadas por Dereczynski, Oliveira e Machado (2009) ao avaliarem a climatologia da precipitação do Município do Rio de Janeiro no período de 1997 a 2006.

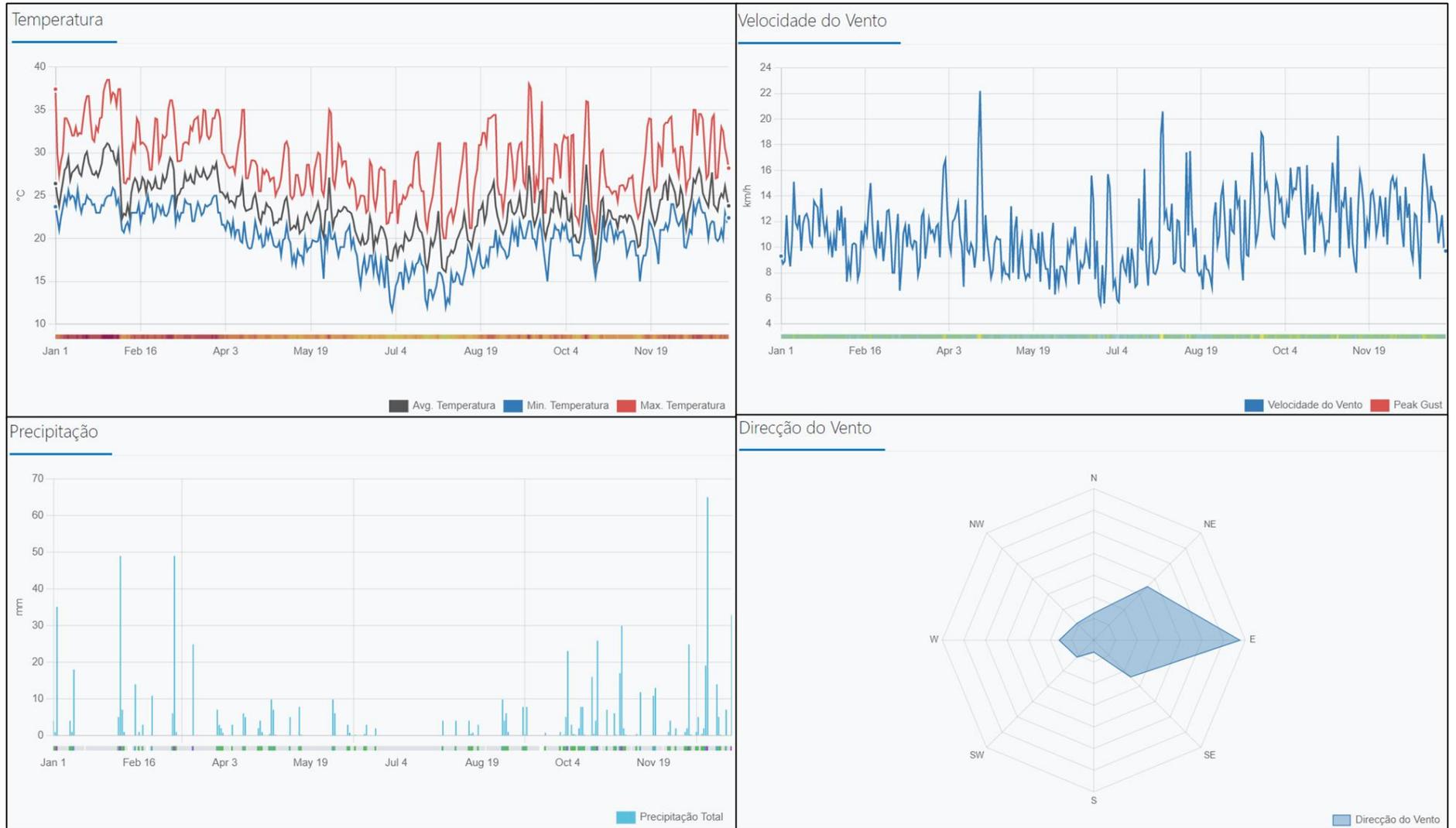
No que tange a temperatura, os meses que apresentaram as maiores médias foram janeiro (27,8 °C) e fevereiro (28,1 °C) e as menores médias ocorreram no período de junho a agosto (**Tabela 3**). Quanto as médias da umidade relativa do ar não foram observadas grandes variações no decorrer dos meses. O valor mínimo foi igual a 68% e o máximo, 72% (**Tabela 4**). Mendes, Armond e Bizerra da Silva (2022) relataram que a região de São Cristóvão se localiza em uma das zonas que possui as menores temperaturas de superfície e as menores amplitudes, inclusive no verão.

Além dos dados oriundos da EASC, também foram verificadas as informações meteorológicas (temperatura, precipitação, velocidades e direção dos ventos) aferidas no SBGL e no SBRJ durante o ano de 2021⁵.

⁵ As informações foram obtidas através do *site* Meteostat, disponível em: <<https://meteostat.net/pt/station/83746?t=2021-01-01/2021-12-31>> e <<https://meteostat.net/pt/place/br/santos-dumont?s=83689&t=2021-01-01/2021-12-31>>.

As **Figuras 13 e 14** revelam que as temperaturas médias mensuradas no SBRJ, durante todo o ano, são ligeiramente mais baixas das que as do SBGL. Já em relação à precipitação, as medições entre os aeroportos são heterogêneas. Durante o todo o ano há mais dias de chuva e em maior quantidade no SBRJ. No SBGL a média da velocidade dos ventos é ligeiramente maior do que no SBRJ e a direção dos ventos é concordante, com predominância para ventos oriundos de leste, nordeste e sudeste. Esses dados coadunam com as análises realizadas por Armond (2014) e Silva (2012).

Figura 13: Dados meteorológicos do Aeroporto do Galeão, Rio de Janeiro, Brasil, em 2021.



Fonte: Adaptado de Meteostat (2022).

Figura 14: Dados meteorológicos do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro, Brasil, em 2021.



Fonte: Adaptado de Meteostat (2022).

A partir das informações acima foi escolhido o período a ser simulado: **01 a 03 de julho de 2021**, sendo o **segundo dia** a data da liberação hipotética do antraz. Os seguintes critérios foram seguidos: meses com menor precipitação (junho, julho e agosto); meses com menores dias de chuva (julho e agosto); os meses com a temperatura mais amena (junho, julho e agosto). A umidade relativa média foi praticamente a mesma em todo o ano. Nos bancos de dados analisados não há informação sobre radiação solar, mas a estação do ano reconhecidamente com a menor radiação solar é o inverno. Essas características propiciariam um cenário ambientalmente favorável para a dispersão, persistência e viabilidade do antraz.

4.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Com relação ao objetivo específico 1:

Para simular cenários de liberação acidental de antraz na área de estudo foi adotado o modelo computacional de dispersão atmosférica HYSPLIT na versão 5.2.0 instalada em computador.

O centro de grade foi definido a partir das coordenadas geográficas do local de estudo (-22,8765, -43,2507); a altura da fonte de emissão corresponde à altura do Pavilhão HPP (~20m acima do nível do solo – em inglês, *above ground level* - AGL); o tipo de trajetória adotado foi *forward*; e altura do topo do modelo foi definida como 10.000m.

Para a execução das trajetórias e das concentrações, relacionadas especificamente ao dia da liberação acidental hipotética, utilizou-se os dados provenientes do GFS 0,25° (período de 01 a 03 de julho de 2021). Esse sistema possui aproximadamente 27 km de resolução horizontal, dimensões de grade de 1440 x 721, resolução temporal de 3 horas, 56 níveis verticais, com arquivos diários de junho de 2019 ao presente, além de dados de previsão de 4 dias para frente (NOAA, 2020). Seus dados estão disponíveis de forma livre no *site* do NOAA, pelo *link*: <<ftp://ftp.arl.noaa.gov/pub/archives>> ou um *download* pode ser realizado diretamente na GUI do modelo HYSPLIT.

As trajetórias e as concentrações foram modeladas entre os dias 02 e 03 de julho de 2021, em quatro períodos: Madrugada/Manhã (3 h às 9 h); Manhã/Tarde (9 h às 15 h); Tarde/Noite (15 h às 21 h); Noite/Madrugada (21 h às 3 h). Os resultados foram coletados a cada hora por um período de 6 horas, a partir do momento da liberação. Essa estratégia visou verificar se em algum período do dia as condições climáticas, principalmente, as relacionadas com os ventos podem ampliar a exposição aos esporos de antraz.

As especificações das partículas liberadas foram definidas de acordo com o estudo de Jamolin *et al.* (2013) onde consideram que os esporos de antraz possuem forma esférica, diâmetro de 1,5 μm e densidade de 1,42 g/cm^3 . A concentração liberada foi igual a 1 g e a liberação ocorreu por 1 h. A saída de concentração de partículas do HYSPLIT foi medida em picogramas (pg). As demais configurações foram adotadas conforme o perfil *default* do modelo.

Com relação ao objetivo específico 2:

Para comparar as simulações executadas no objetivo específico 1 foram realizadas simulações numéricas provenientes do modelo WRF (SKAMAROCK *et al.*, 2021) na versão 4.3.3, para o período de 01 a 03 de julho de 2021. A simulação foi disparada com 24 h de antecedência ao dia de interesse para eliminação do efeito de *spin-up* do modelo (tempo de ajuste do modelo), de acordo com Silveira e Carvalho (2021).

As simulações utilizaram 3 grades numéricas com resoluções horizontais de 9 km, 3 km e 1 km. O aninhamento do tipo unidirecional foi aplicado neste estudo. As grades têm centro em 22.8765°S/43.2507°W e dimensões de 181 pontos nas direções zonal e meridional. Nesses 3 domínios, foram utilizados 60 níveis com a mesma distribuição vertical, estando 12 níveis nos primeiros 1.500 m acima da superfície.

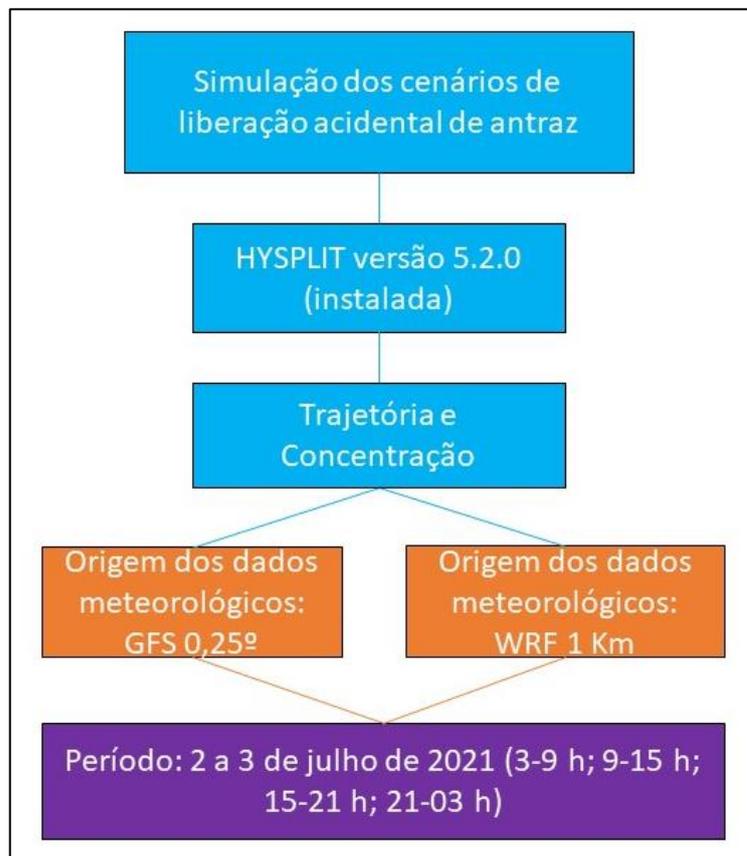
As parametrizações físicas usadas foram: *Yonsei University* (YSU), para a camada limite atmosférica; *Mesoscale Model version 5 - Revised* (MM5), para a camada de superfície; *Noah-Multiparameterization Land Surface Model* (Noah-MP), para o solo; *Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models* (RRTMG); para radiação de onda curta e onda longa; *Kain-Fritsh* modificado, para nuvens cumulus e *WRF Single-moment 6-class Scheme* (WSM6), para microfísica de nuvens. Destaca-se que a parametrização para nuvens cumulus foi usada apenas no domínio menos resoluto. Como condições iniciais e de contorno foram utilizados os resultados de *Final Analysis* (FNL) do GFS com resolução horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ e resolução temporal de 6 horas (NCEP/NWS/NOAA/US, 2022). Os resultados do GFS foram adquiridos de forma livre no *link*: <<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>>.

A partir dessas simulações foram construídos mapas de campo de vento a 10 m de altura e a saída WRF do domínio equivalente a 1 km foi fornecida para a entrada meteorológica necessária para executar o modelo HYSPLIT. O arquivo de saída do WRF encontrava-se em formato NetCDF e foi convertido em formato WRF-ARW utilizando a própria GUI do HYSPLIT.

A seguir apresenta-se o fluxograma referente a estratégia metodológica utilizada para

executar as modelagens computacionais da dispersão acidental do antraz (**Figura 15**).

Figura 15: Fluxograma da estratégia metodológica utilizada nas modelagens computacionais da dispersão acidental do antraz.



Fonte: Elaboração própria.

Além da análise gráfica das simulações, foram executados os relatórios de perfil dos parâmetros meteorológicos na GUI do HYSPLIT (*meteorology>display data>text profile*). Os *inputs* referentes as variáveis temperatura, direção e velocidade do vento e pressão dos modelos HYSPLIT-GFS 0,25° e HYSPLIT-WRF 1 km foram comparados com os dados observados na EASC e nos aeródromos SBGL e SBRJ. Para avaliar tal desempenho entre os modelos foram adotados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (COR); erro quadrático médio normalizado (EQMN); erro absoluto médio (EAM); erro médio (BIAS); desvio fracional (Fb) e desvio fracional padrão (Fs).

O COR determina qual é a relação linear entre os valores prognosticados e os valores observados, já o EQMN é a média quadrática da diferença desses valores. O EAM é a soma dos valores absolutos dos erros. O BIAS indica tendência de erro ou vício dos modelos. O Fb informa percentualmente o quanto os dados previstos estão subestimando ou superestimando os dados observados e o Fs indica se a dispersão simulada em torno da média da variável é

superestimada ou subestimada. Esses índices foram os mesmos analisados por Moraes, Marton e Pimentel (2014) ao analisarem o desempenho dos modelos MM5 e WRF na simulação da temperatura do ar em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e por Corrêa, Cataldi e Pimentel (2006) ao analisarem as simulações do modelo MM5 em relação aos dados meteorológicos observados para a região do SBGL.

Também foram calculadas as distâncias entre as trajetórias HYSPLIT-GFS 0,25° e HYSPLIT-WRF 1 km e as respectivas diferenças de altura e pressão, com base nos arquivos *tdump* gerados durante as simulações no modelo HYSPLIT.

Com relação ao objetivo específico 3:

Para elencar as potencialidades e limitações do modelo HYSPLIT dentro contexto estudado, os resultados dos objetivos 1 e 2 foram utilizados como referência. Também foi registrada a experiência do usuário em relação à utilização do referido modelo.

Com relação ao objetivo específico 4:

A matriz de análise foi delineada elencando as principais tarefas de cada etapa da gestão de eventos biológicos acidentais (planejamento, preparação, resposta e recuperação), de acordo com os seguintes documentos:

- (a) Plano de Respostas às Emergências em Saúde Pública, do MS do Brasil;
- (b) Manual de Campanha de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear, do Exército Brasileiro;
- (c) Manual de Respostas em Situações de Emergência em Saúde, da Marinha do Brasil
- (d) *Multiservice Tactics, Techniques, and Procedures for Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Consequence Management Operations*, das Forças Armadas do EUA.

Posteriormente, as principais contribuições do modelo HYSPLIT, analisadas dentro do contexto da tese, foram relacionadas às principais tarefas de gestão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O emprego do modelo HYSPLIT é amplamente difundido no meio científico. Na base SCOPUS são quase 2.000 materiais indexados, incluindo 23 patentes, resultantes da busca [HYSPLIT OR “*Hybrid single-particle Lagrangian integrated Trajectory*”] no título, resumo e palavras-chave (busca executada em abril de 2022). Essa produção técnico-científica permeia 5 das 8 áreas de conhecimento reconhecidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Ciências Exatas e da Terra, Ciências Biológicas, Engenharias, Ciências da Saúde; Ciências Agrárias).

A seguir serão apresentados os resultados das estratégias adotadas para responder a pergunta da pesquisa: “O modelo HYSPLIT pode ser uma potencial ferramenta de gestão frente a cenários de liberação acidental de antraz?”.

Buscou-se simular cenários hipotéticos envolvendo a liberação acidental desse agente biológico em distintas partes do dia, em um período do ano que possui características meteorológicas que podem ampliar sua exposição, viabilidade e persistência ambiental.

Primeiramente as simulações utilizaram dados meteorológicos oriundos do sistema GFS 0,25°, disponibilizados pelo próprio NOAA em formato compatível com o modelo HYSPLIT. O *download* dos dados desse sistema pode ser executado dentro da própria interface do modelo HYSPLIT, o que possibilita uma simulação mais célere e sem necessidade de conhecimento aprofundado na modelagem do sistema GFS. Por outro lado, esses dados possuem resolução espacial e temporal mais grosseira e podem não representar em sua totalidade as condições climáticas e as características de relevo mais complexas, como as das áreas urbanas.

Posteriormente, comparou-se essas simulações com simulações do HYSPLIT adotando os dados meteorológicos oriundos do modelo WRF 1 km, que possui maior resolução espacial e temporal. O desempenho desses dois grupos de simulações foi avaliado tanto qualitativamente, quanto estatisticamente a partir de comparação com os dados observados de 3 estações meteorológicas próximas ao local de estudo.

A partir dessas análises foram elencadas algumas potencialidades e limitações da utilização do modelo HYSPLIT frente ao contexto estudado, bem como foram registrados alguns aspectos relativos à experiência do usuário.

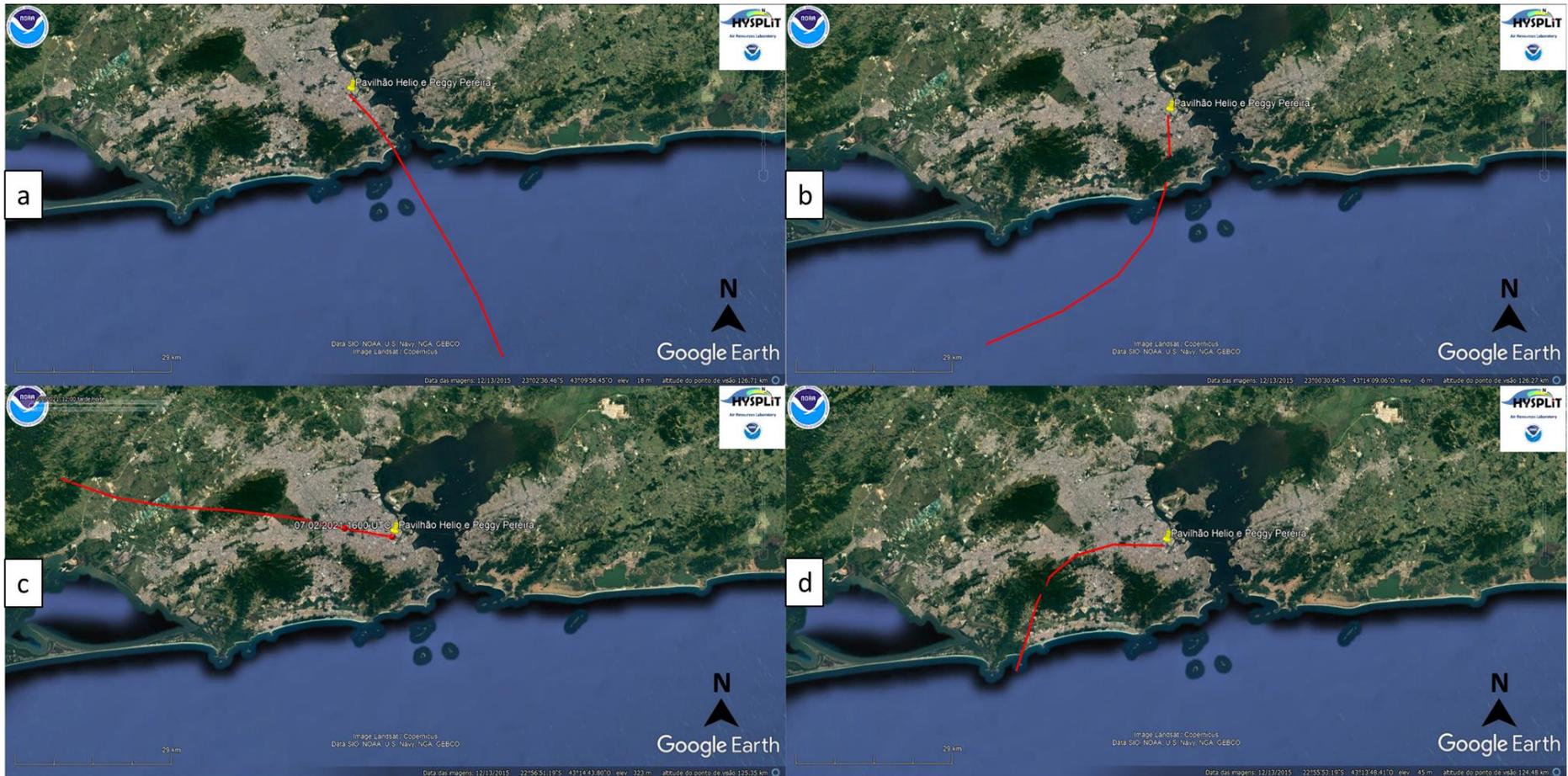
Por fim, todas essas informações auxiliaram no delineamento de como o modelo pode colaborar frente a cada etapa da gestão de eventos que envolvam a liberação acidental de antraz em laboratórios de pesquisa.

5.1 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS CARACTERIZANDO A LIBERAÇÃO ACIDENTAL DE ANTRAZ NA PLATAFORMA NB3 DO IOC, CAMPUS FIOCRUZ/MANGUINHOS

Trajétórias

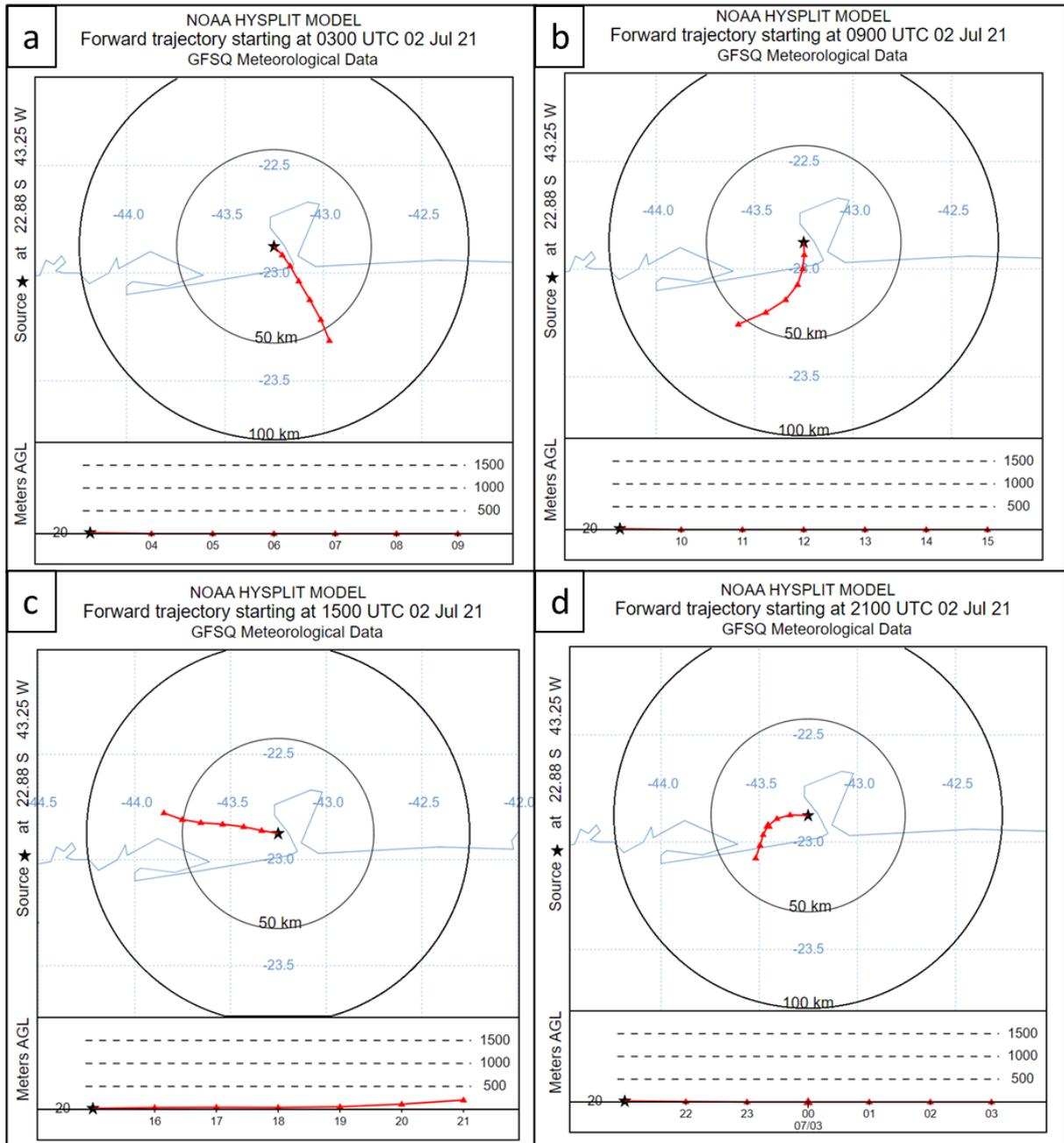
As **Figuras 16 e 17** apresentam as simulações das trajetórias das massas aéreas, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia durante uma corrida de 6 h com dados meteorológicos oriundos do sistema GFS 0,25°.

Figura 16: Trajetórias das massas aéreas, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) 3-9 h; (b) 9-15 h; (c) 15-21 h; (d) 21-03h.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 17: Trajetórias das massas aéreas, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) 3-9 h; (b) 9-15 h; (c) 15-21 h; (d) 21-03h.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT.

No período da madrugada/manhã a trajetória apresenta um traçado em direção à sudeste da cidade, sobrevoando na primeira hora da simulação a região dos bairros de Benfica, São Cristovão e Praça da Bandeira. Após 1 h de execução, a trajetória sobrevoa a Zona Sul, em direção ao bairro de Copacabana. Após 2 h, as massas aéreas passam a sobrevoar o Oceano Atlântico (**Figuras 16a e 17a**).

No período da manhã/tarde o sentido traçado é inicialmente à sul e após 2 h de simulação

ocorre uma mudança para o sentido sudoeste. Na primeira hora de execução a trajetória das massas aéreas sobrevoa a região dos bairros de Manginhos, Riachuelo, Vila Isabel e Tijuca. Após 2 h está na região de São Conrado e partir daí passa a sobrevoar o Oceano Atlântico (**Figuras 16b e 17b**).

Já no período tarde/noite a trajetória apresenta traçado no sentido noroeste. Durante a primeira hora sobrevoa a região correspondente aos bairros de Higienópolis e Inhaúma. Após 1 h percorre Vicente de Carvalho e registra uma passagem pela Serra do Mendanha. No final da simulação chega na região situada entre o município de Itaguaí e o bairro de Seropédica (**Figuras 16c e 17c**).

Por fim, no período noite/madrugada a trajetória apresenta um perfil de direção à oeste até a primeira hora, sobrevoa os bairros de Higienópolis, Inhaúma e chega à Madureira. A partir da segunda hora, a direção é alterada para o sentido sudoeste indo em direção ao Parque Nacional da Pedra Branca. Na última hora de execução da trajetória a mesma alcança o bairro do Recreio dos Bandeirantes e termina sobrevoando o Oceano Atlântico (**Figuras 16d e 17d**).

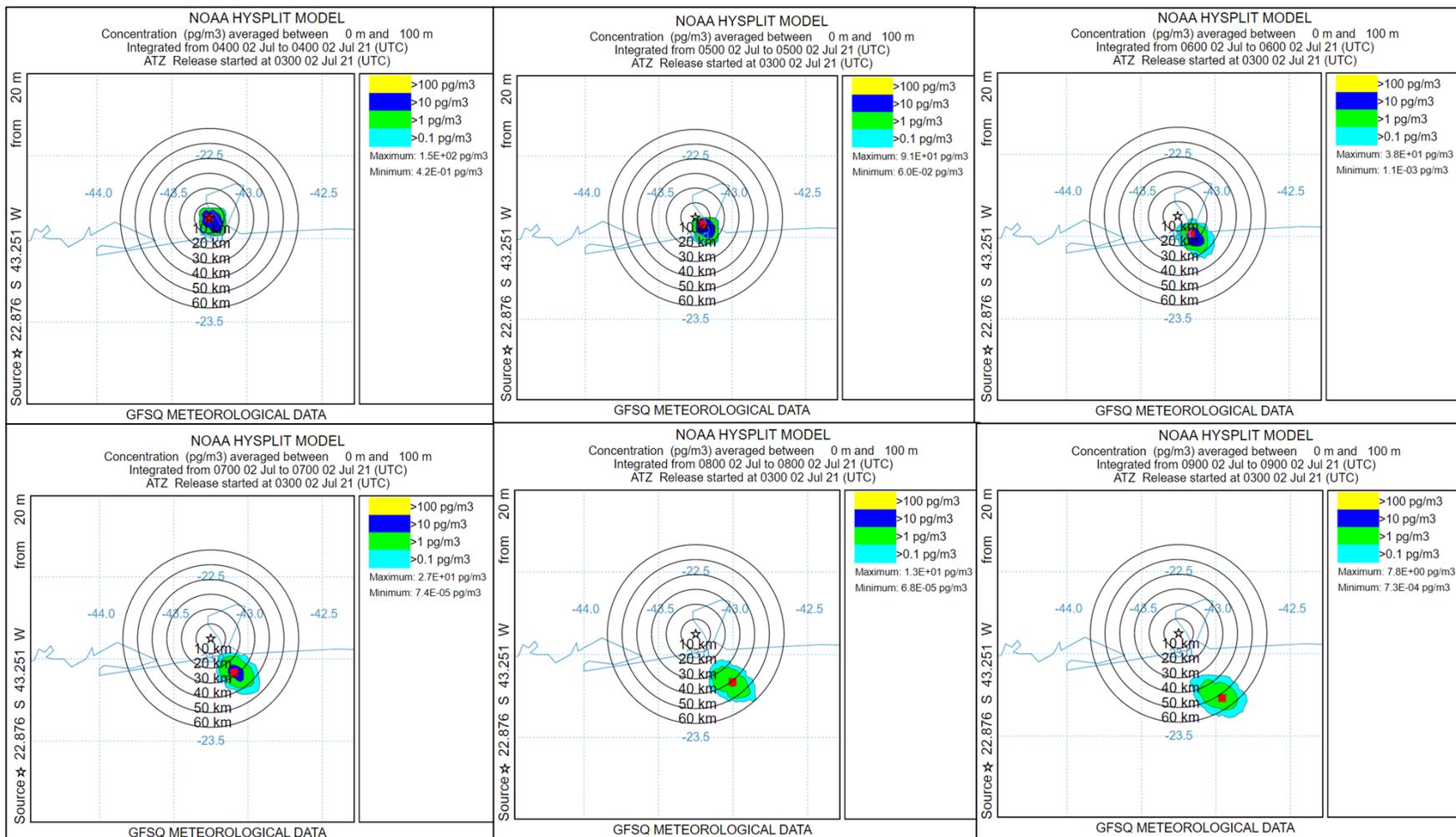
Todas as trajetórias ultrapassam o raio de 50 km de extensão, com exceção da trajetória referente ao período da noite/madrugada (**Figura 17**). Essa característica demonstra que as trajetórias podem exceder todas estimativas de áreas de predição do tipo detalhada adotadas no Manual de Defesa QBRN da Marinha do Brasil, incluindo a mais conservadora (quando há detecção, mas não se conhece o local de liberação) (**Figura 4**) (MB, 2018).

As simulações desconsideram algumas características topográficas da RMRJ, como por exemplo a existência da Serra do Mendanha e o Parque Nacional da Pedra Branca. Nas simulações, as trajetórias apenas cruzam graficamente esses locais. Hernández-Ceballos *et al.* (2014) e Silva (2012) indicam que a existência de barreiras físicas altera a dinâmica dos ventos locais e os modelos podem não ser capazes de reproduzir com destreza esses efeitos, o que gera inconsistência entre os dados simulados e os observados.

Concentrações

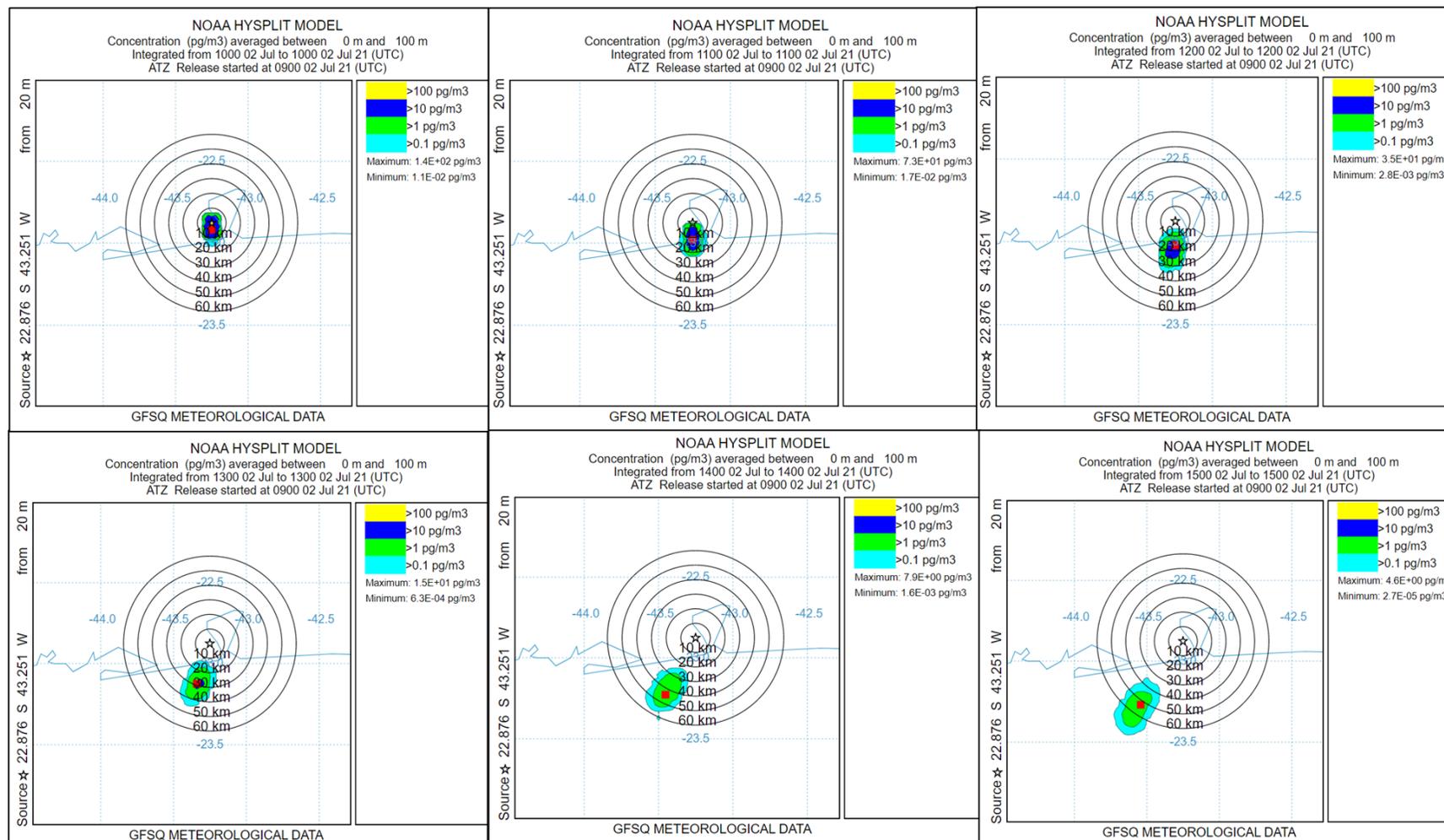
As **Figuras 18 a 21** apresentam as simulações das concentrações, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia durante uma corrida de 6 h com dados meteorológicos oriundos do sistema GFS 0,25°. O tamanho da célula da grade de concentração é representado pelo quadrado vermelho nas referidas figuras.

Figura 18: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.



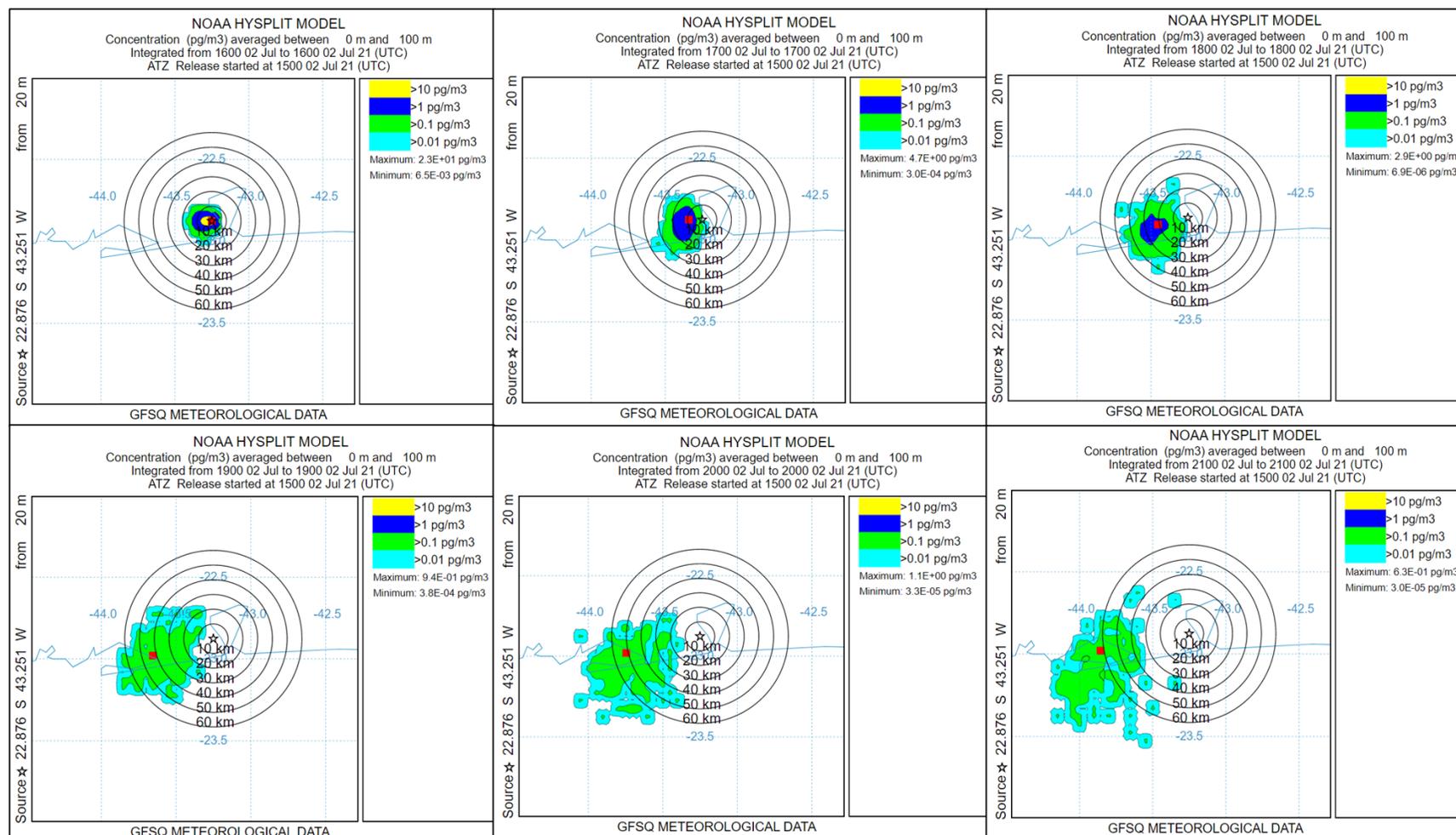
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT.

Figura 19: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.



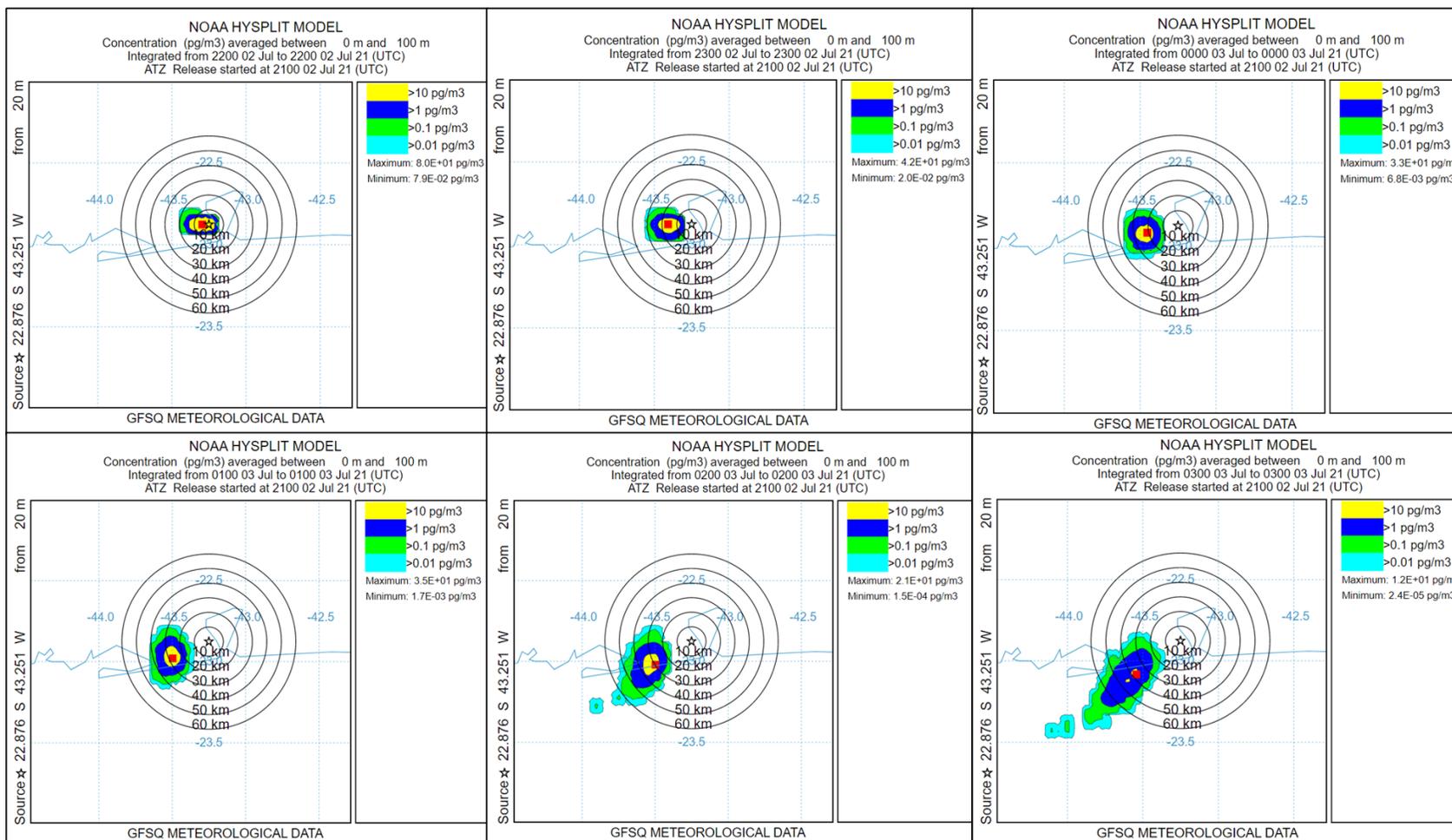
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT.

Figura 20: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT.

Figura 21: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT.

A dispersão da pluma de cada intervalo analisado apresenta perfil semelhante ao apresentado nas respectivas simulações das trajetórias das massas aéreas (**Figuras 16 e 17**).

Nos períodos da Madrugada/Manhã e Manhã/Tarde verifica-se que a máxima concentração de antraz foi 10 vezes maior que a concentração dos demais períodos simulados. Além disso, o espalhamento da pluma também é menor. Esses fatos podem estar relacionados às características meteorológicas da região, principalmente, a dinâmica dos ventos, que nesse local é fortemente influenciada pelas brisas marítimas e terrestres (MORAES; MARTON; PIMENTEL, 2014).

Silveira e Carvalho (2021) ao estudar as condições meteorológicas da RMRJ verificaram que em dias de alta concentração de poluentes, mesmo em períodos de brisa marítima mais intensa, se a velocidade dos ventos for mais baixa, a dispersão dos poluentes ocorre de forma mais lenta, o que reflete no aumento da concentração de poluentes.

Em todos os períodos analisados, as concentrações de antraz com maior carga infectante ficaram restritas as proximidades do local de liberação, num raio menor que 1 km, porém a contaminação ambiental pode ocorrer para além da RMRJ. Segundo Nguyen (2017) apenas para executar a rastreabilidade do impacto ambiental desse tipo de evento seriam necessários até 1 milhão de testes ambientais, o que custaria centenas de milhões de reais.

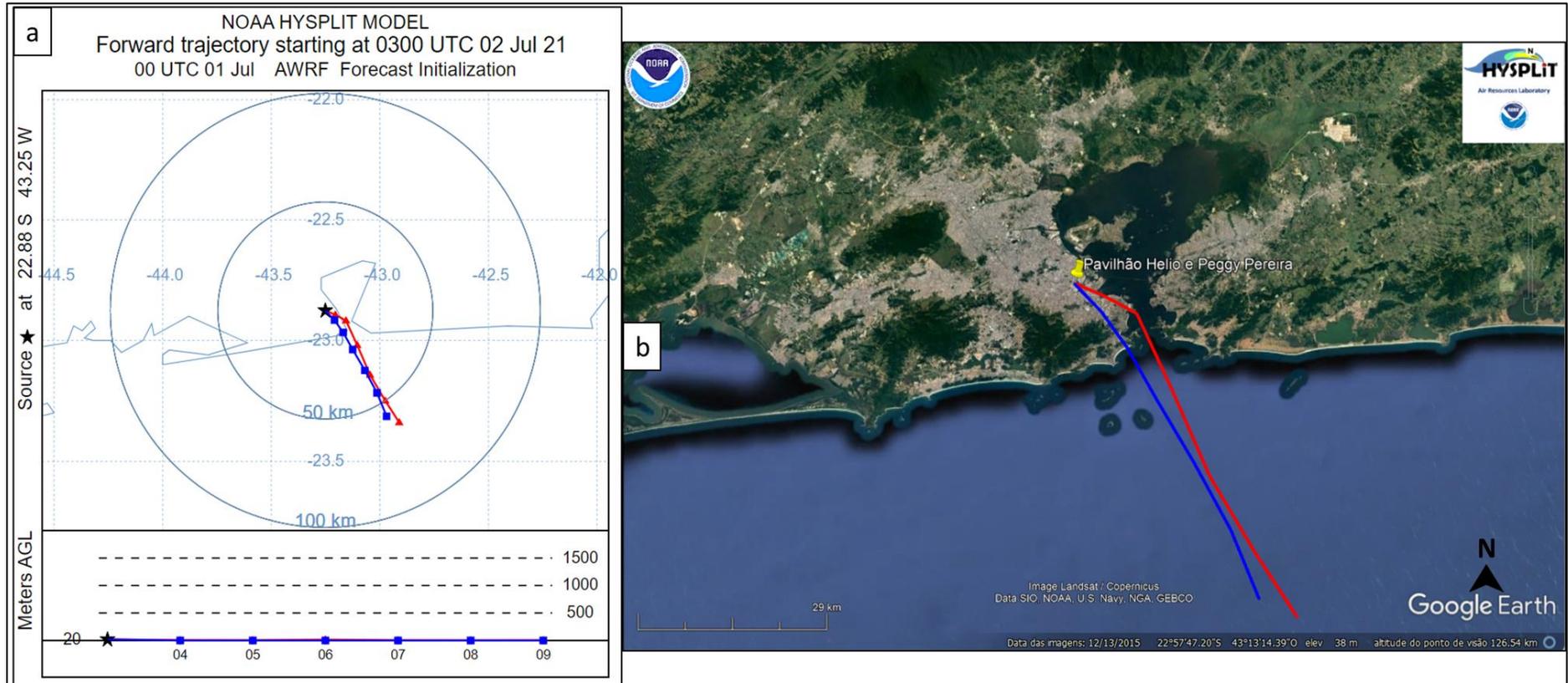
5.2 COMPARAÇÃO MODELAGEM HYSPLIT- GFS 0,25° *VERSUS* HYSPLIT-WRF 1 KM

Conforme já mencionado, uma modelagem que utiliza dados meteorológicos com baixa resolução espacial e temporal, como o GFS 0,25°, pode não ser capaz de considerar os efeitos da complexidade do terreno, bem como as mudanças bruscas nas características meteorológicas, frente a dispersão de partículas na atmosfera. A seguir serão apresentadas as comparações espaciais e descritivas das simulações executadas com dados do GFS 0,25° *versus* WRF 1km. Além disso, também serão comparadas algumas variáveis meteorológicas oriundas das simulações *versus* dados observados oriundos das estações meteorológicas próximas ao bairro de Manguinhos.

Trajétórias

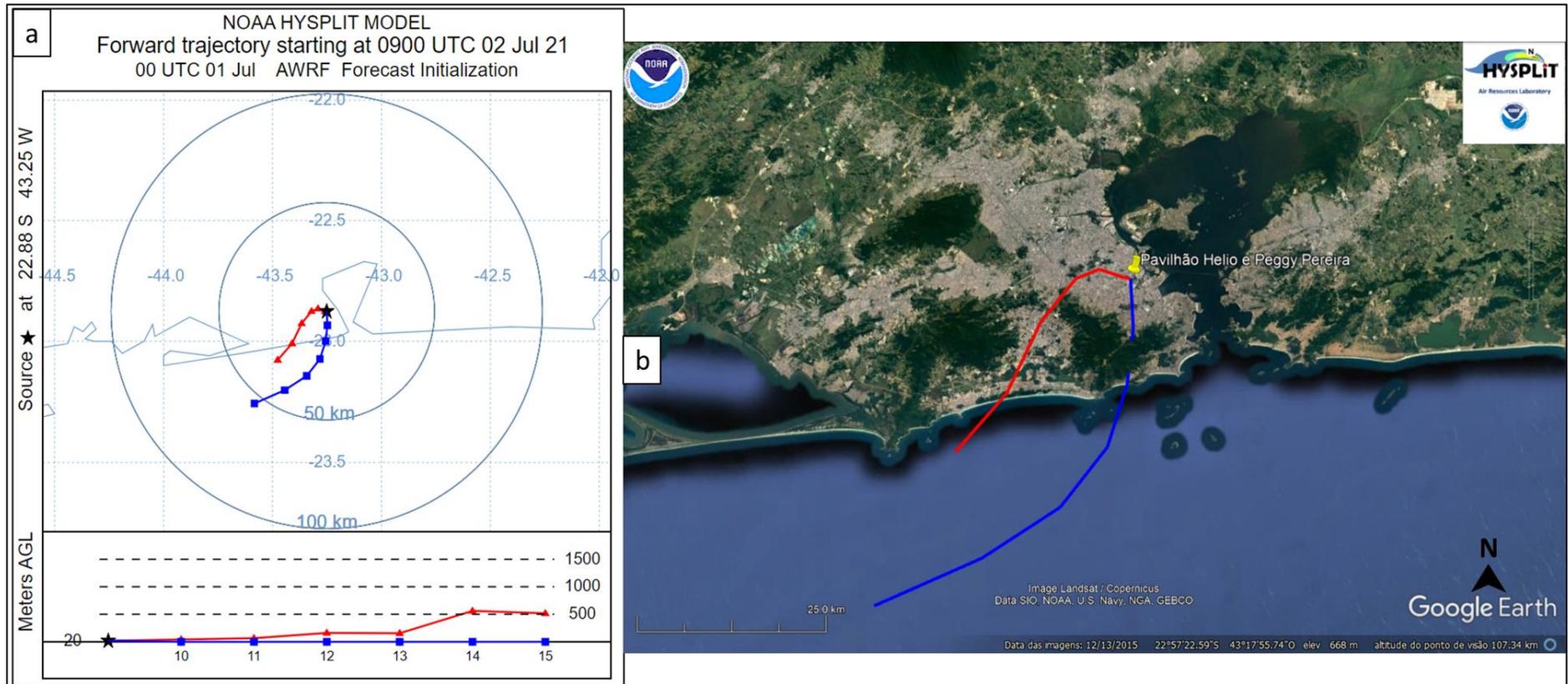
As **Figuras 22 a 25** e a **Tabela 5** apresentam a comparação espacial entre as trajetórias, do tipo *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia durante uma corrida de 6 h com dados meteorológicos oriundos dos sistemas GFS 0,25° e WRF 1 km.

Figura 22: Trajetórias das massas aéreas, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no *Google Earth*.



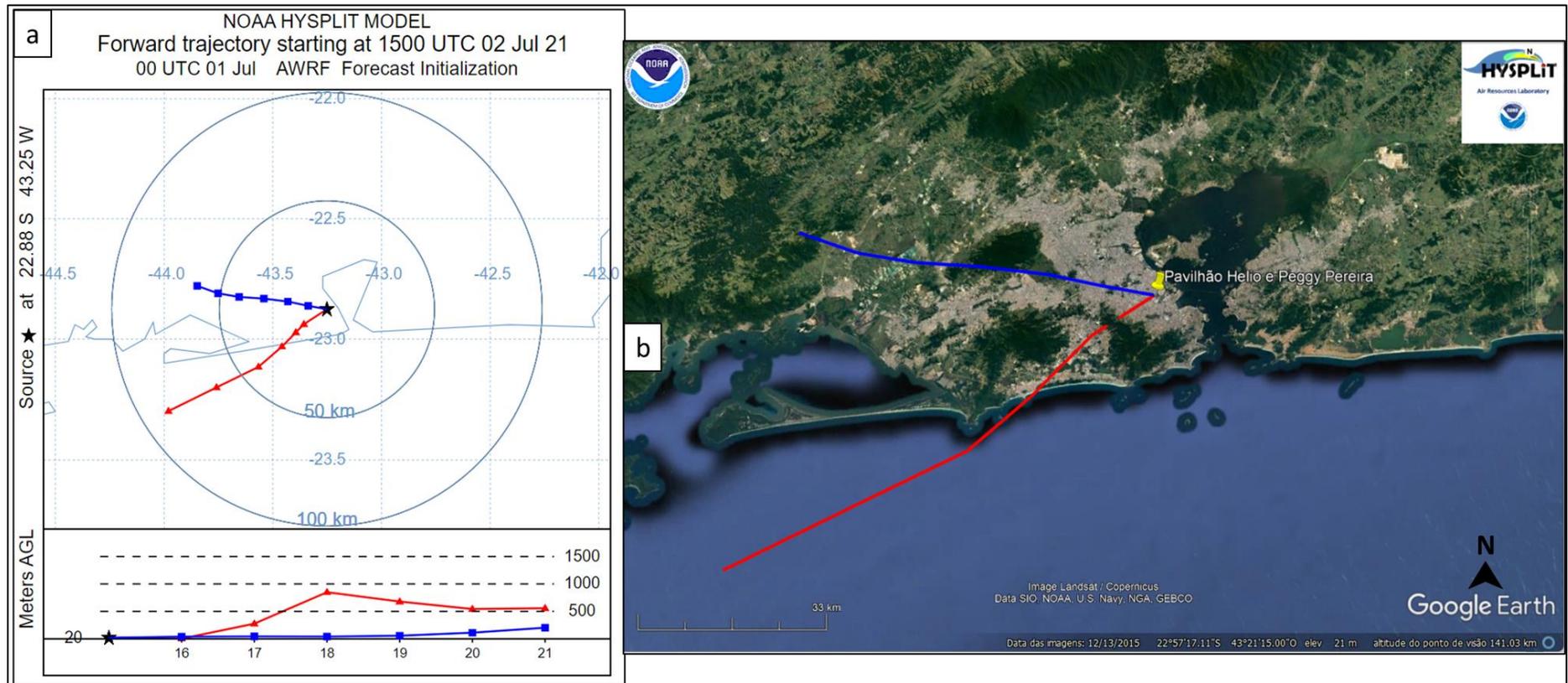
Nota: Linha azul: GFS 0,25° ; Linha vermelha: WRF 1 km.
 Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 23: Trajetórias das massas aéreas, com direção forward, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no *Google Earth*.



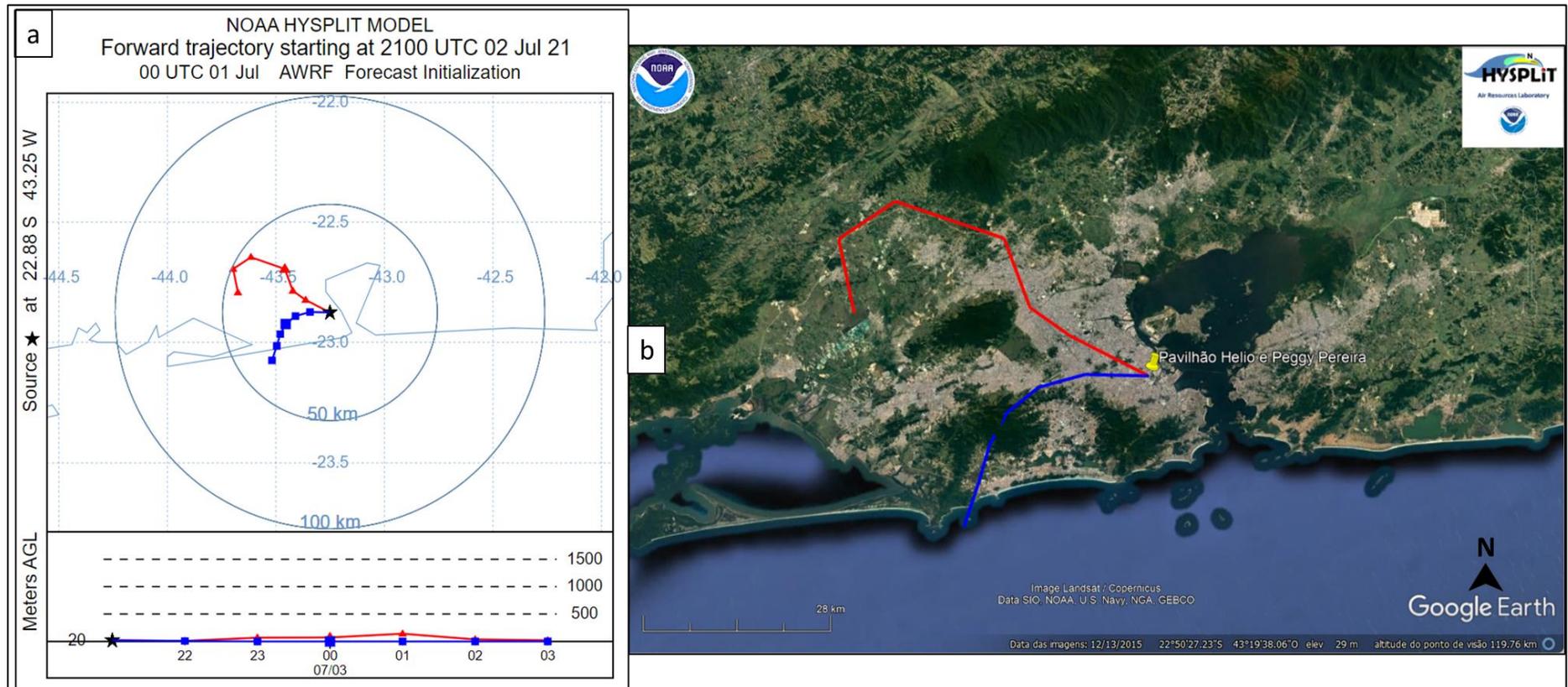
Nota: Linha azul: GFS 0,25° ; Linha vermelha: WRF 1 km.
 Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 24: Trajetórias das massas aéreas, com direção forward, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no *Google Earth*.



Nota: Linha azul: GFS 0,25° ; Linha vermelha: WRF 1 km.
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 25: Trajetórias das massas aéreas, com direção forward, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz no período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) saída modelo HYSPLIT; (b) saída modelo HYSPLIT no *Google Earth*.



Nota: Linha azul: GFS 0,25° ; Linha vermelha: WRF 1 km;
 Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Ao comparar as saídas gráficas das simulações verifica-se que existem diferenças no sentido e na altura das trajetórias de massas aéreas. As trajetórias executadas pelo modelo HYSPLIT-WRF 1 km não cruzam graficamente as barreiras topográficas e sim as sobrevoam, diferentemente do que ocorre nas simulações HYSPLIT-GFS 0,25°, confirmando um dos benefícios de adotar modelos com menor resolução espacial e temporal.

Todas as trajetórias ultrapassam o raio de 50 km de extensão, com exceção da trajetória referente ao período da noite/madrugada (**Figuras 21 a 24**).

Tabela 5: Comparação do posicionamento espacial e da pressão atmosférica entre as trajetórias, na direção *forward*, executadas com os dados meteorológicos oriundos do HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS) *versus* HYSPLIT-WRF 1km (WRF), referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.

PERÍODO	DATA/HORA	LATITUDE		LONGITUDE		PRESSÃO (hPa)		ALTURA (m)		DISTÂNCIA (km)
		GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS X WRF
MADRUGADA/ MANHÃ	02072021/03:00	-22.876	-22.876	-43.251	-43.251	1018,4	1022,0	20,0	20,0	-
	02072021/04:00	-22.916	-22.894	-43.209	-43.205	1019,5	1023,8	0,0	7,2	2,5
	02072021/05:00	-22.967	-22.918	-43.169	-43.156	1019,3	1024,5	0,0	5,3	5,6
	02072021/06:00	-23.038	-23.020	-43.125	-43.104	1020,1	1023,5	0,0	16,5	2,9
	02072021/07:00	-23.124	-23.143	-43.069	-43.045	1022,1	1024,3	0,0	5,4	3,2
	02072021/08:00	-23.217	-23.250	-43.013	-42.975	1023,7	1024,4	0,0	3,5	5,3
	02072021/09:00	-23.314	-23.339	-42.969	-42.911	1024,2	1024,6	0,0	5,2	6,5
MANHÃ/TARDE	02072021/09:00	-22.876	-22.876	-43.251	-43.251	1017,8	1021,8	20,0	20,0	-
	02072021/10:00	-22.934	-22.875	-43.248	-43.259	1019,3	1019,1	0,0	42,6	6,6
	02072021/11:00	-22.999	-22.865	-43.256	-43.291	1019,3	1013,1	0,0	65,6	15,3
	02072021/12:00	-23.073	-22.876	-43.282	-43.321	1021,5	1000,4	0,0	161,6	22,2
	02072021/13:00	-23.143	-22.926	-43.343	-43.366	1022,6	1006,2	0,0	155,2	24,1
	02072021/14:00	-23.202	-23.009	-43.444	-43.410	1023,0	956,7	0,0	561,4	21,7
	02072021/15:00	-23.257	-23.077	-43.583	-43.476	1023,1	964,9	0,0	517,5	22,7

Fonte: Elaboração própria.

Continuação – Tabela 5: Comparação do posicionamento espacial e da pressão atmosférica entre as trajetórias, na direção *forward*, executadas com os dados meteorológicos oriundos do HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS) e do HYSPLIT-WRF 1km (WRF), referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.

PERÍODO	DATA/HORA	LATITUDE		LONGITUDE		PRESSÃO (hPa)		ALTURA (m)		DISTÂNCIA (km)
		GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS X WRF
TARDE/NOITE	02072021/15:00	-22.876	-22.876	-43.251	-43.251	1017,7	1021,0	20,0	20,0	-
	02072021/16:00	-22.862	-22.938	-43.337	-43.357	1012,4	1019,9	39,9	3,6	8,7
	02072021/17:00	-22.844	-22.972	-43.431	-43.394	1007,4	991,7	45,2	276,7	14,7
	02072021/18:00	-22.832	-23.031	-43.541	-43.458	1004,9	925,9	42,0	849,5	23,6
	02072021/19:00	-22.825	-23.115	-43.655	-43.566	1004,0	945,2	56,9	679,3	33,4
	02072021/20:00	-22.810	-23.200	-43.752	-43.759	996,4	960,7	112,7	543,6	43,2
NOITE/ MADRUGADA	02072021/21:00	-22.779	-23.298	-43.848	-43.980	967,7	959,3	203,1	558,3	59,0
	02072021/22:00	-22.874	-22.824	-43.343	-43.363	1015,1	1019,7	8,9	10,0	5,9
	02072021/23:00	-22.891	-22.786	-43.410	-43.422	1014,4	1013,9	0,0	68,5	11,7
	03072021/00:00	-22.924	-22.695	-43.455	-43.459	1014,6	1010,7	0,0	72,7	25,4
	03072021/01:00	-22.966	-22.646	-43.480	-43.615	1015,0	1010,7	0,0	140,9	38,0
	03072021/02:00	-23.015	-22.695	-43.496	-43.697	1015,8	1013,8	0,0	37,5	41,0
	03072021/03:00	-23.075	-22.793	-43.518	-43.675	1017,7	1019,6	0,0	20,3	35,1

Fonte: Elaboração própria.

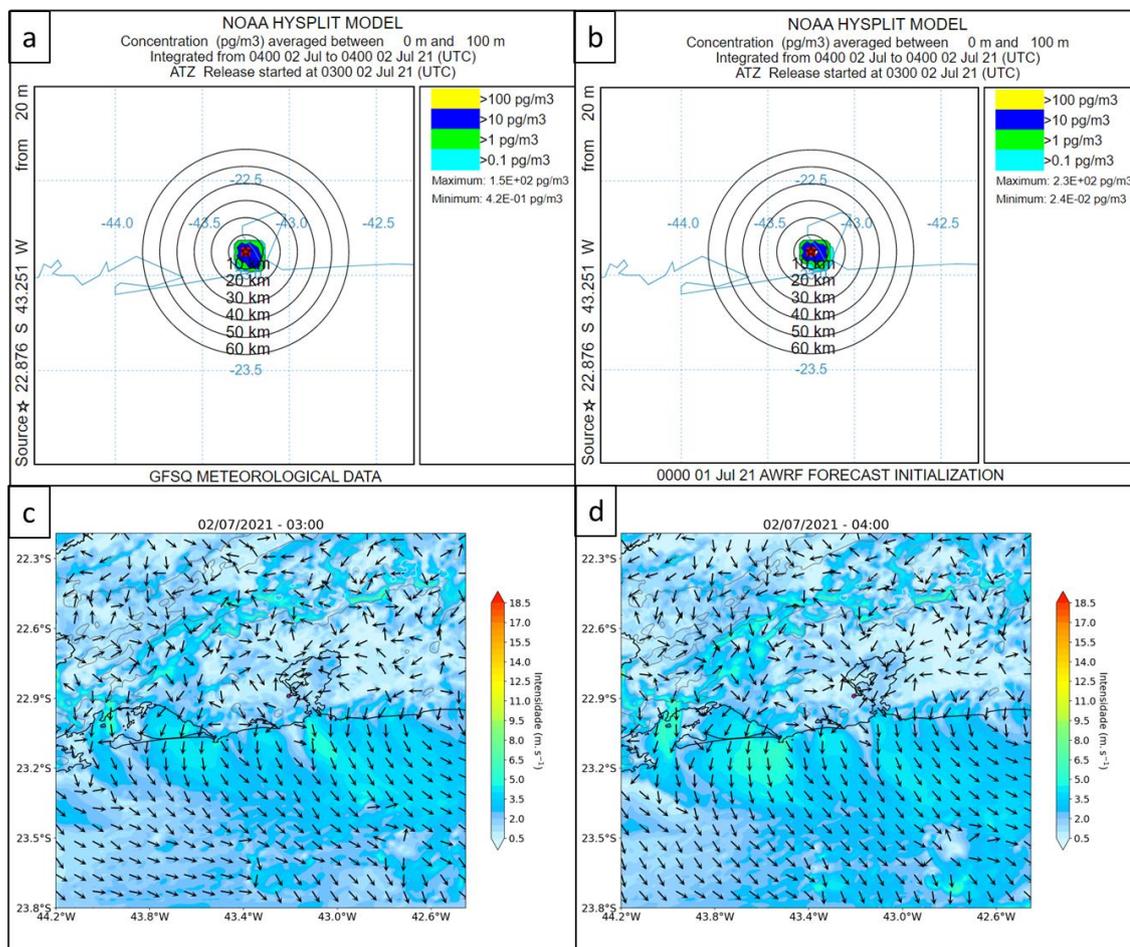
Ao avaliar as saídas numéricas das simulações nota-se que a maioria dos *outputs* relacionados à altura no HYSPLIT-GFS 0,25° apresentam o valor de 0 m. A exceção ocorreu na trajetória referente ao período da tarde/noite, que chegou a alcançar 203,1 m de altura e no primeiro tempo de interpolação da trajetória referente à noite/madrugada. Alguns testes foram realizados alterando a configuração dos métodos de movimento vertical, mas os valores permaneceram os mesmos, o que indica uma limitação na modelagem. Já em relação ao modelo HYSPLIT-WRF 1 km, a altura variou de 3,5 a 849,5 m. Os valores mais baixos podem ser observados com maior frequência nos períodos de calma e os mais altos, nos períodos de influência das brisas marítimas e terrestres.

A variável pressão atmosférica apresenta as maiores diferenças entre a maioria das saídas relativas aos períodos da manhã/tarde e tarde/noite e ao avaliar a distância entre as trajetórias constata-se que em todos os períodos, a maioria dos valores ultrapassa os 10 km, com exceção do período da madrugada/manhã (**Tabela 5**). Essas diferenças provavelmente estão atreladas a capacidade do modelo WRF 1 km possuir maior resolução espacial e temporal do que o modelo GFS 0,25°. Hernández-Ceballos *et al.* (2014) demonstram que a entrada de dados do WRF em altas resoluções melhora as análises no modelo HYSPLIT, principalmente, em áreas de fluxos complexos, como as áreas que sofrem com os efeitos de brisas, característica da área de estudo da tese.

Concentrações

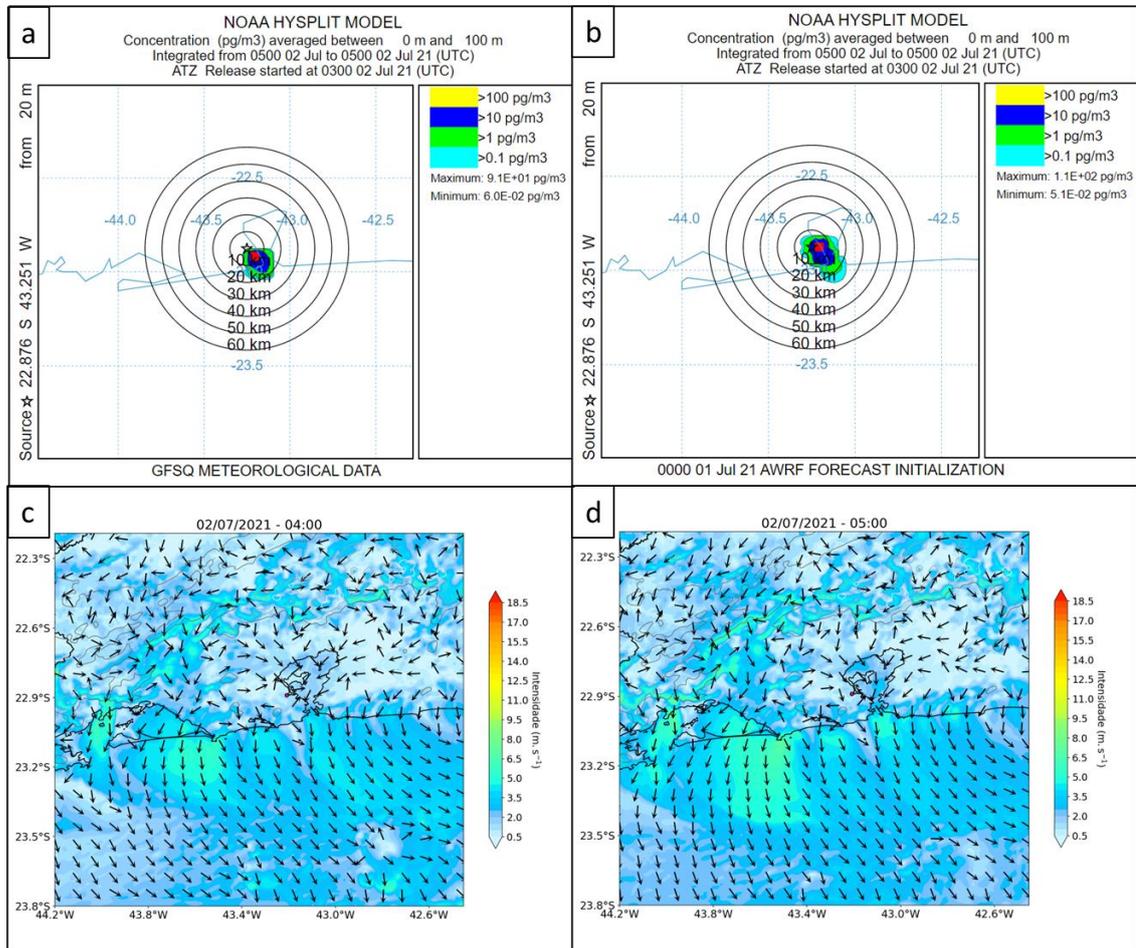
As **Figuras 26 a 49** apresentam as comparações espaciais das simulações das concentrações, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia durante uma corrida de 6 h com dados meteorológicos oriundos do sistema GFS 0,25° *versus* WRF 1 km. Elas também elucidam os campos de vento a 10 m de altura em cada período de integração das rodadas da simulação. Ressalta-se que os quadrados vermelhos contidos nas referidas figuras representam o tamanho da célula da grade de concentração.

Figura 26: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



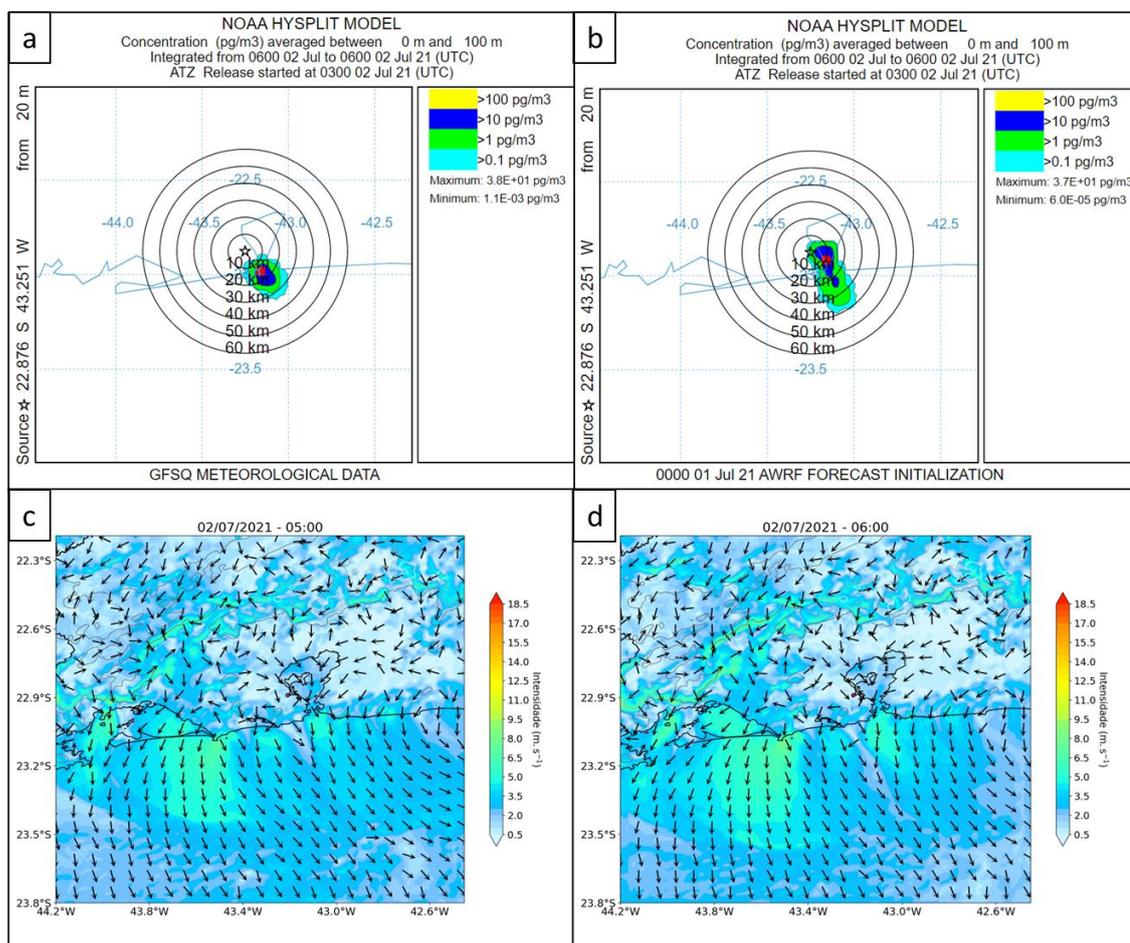
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 27: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



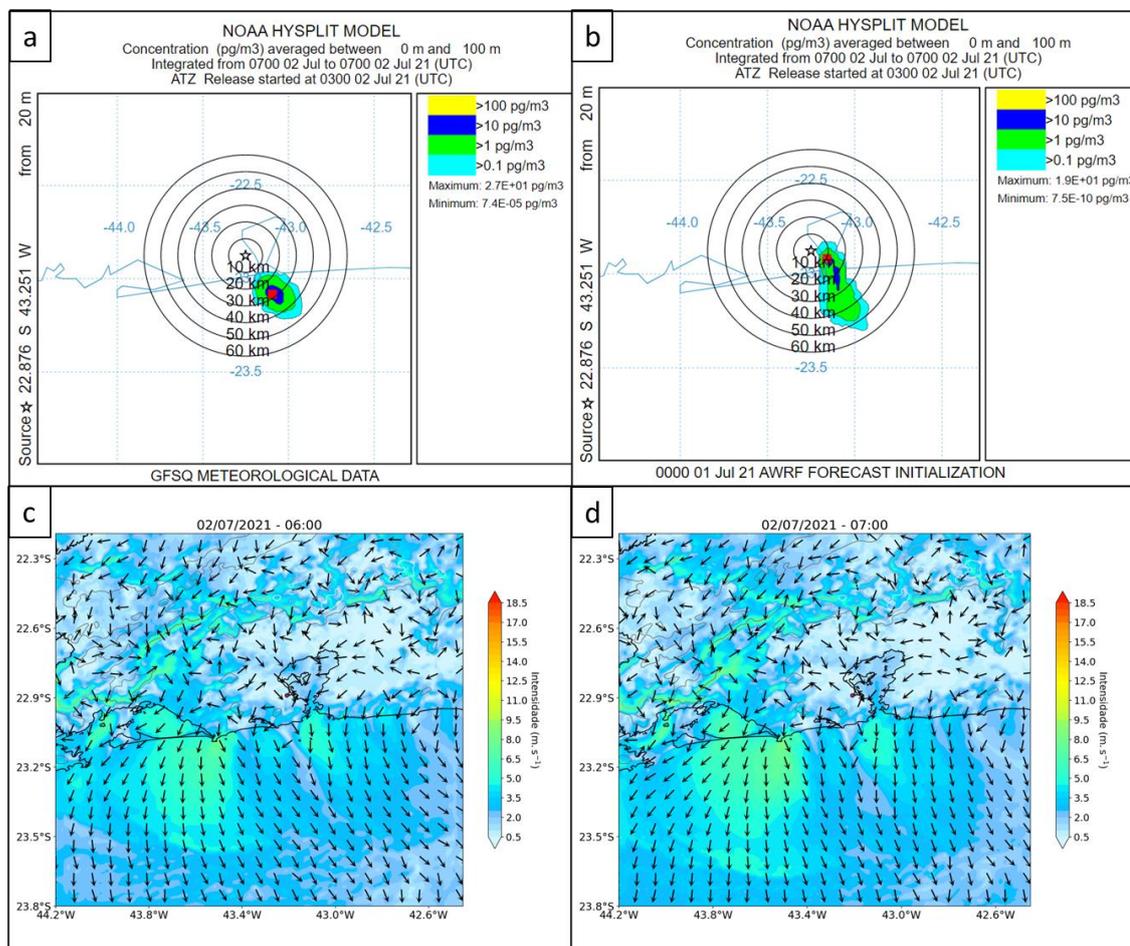
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 28: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



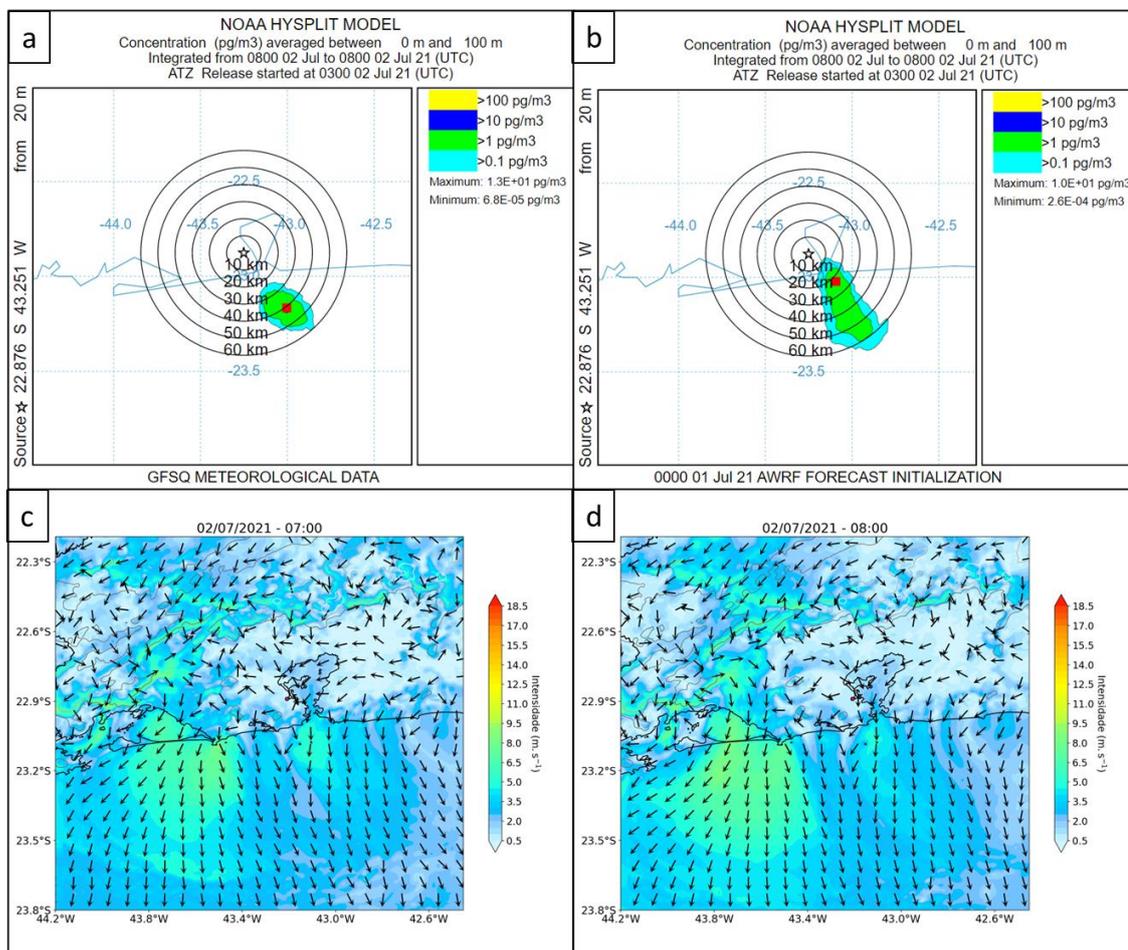
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 29: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



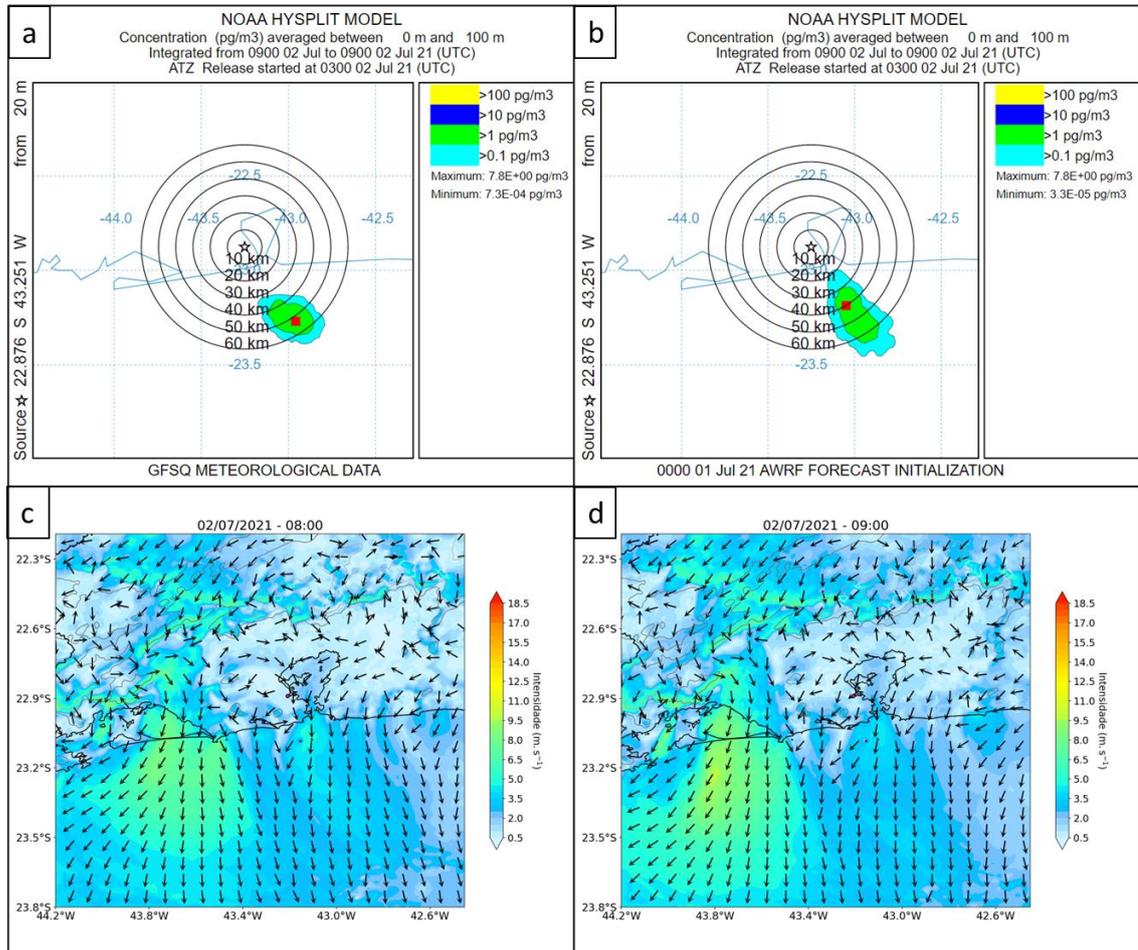
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 30: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



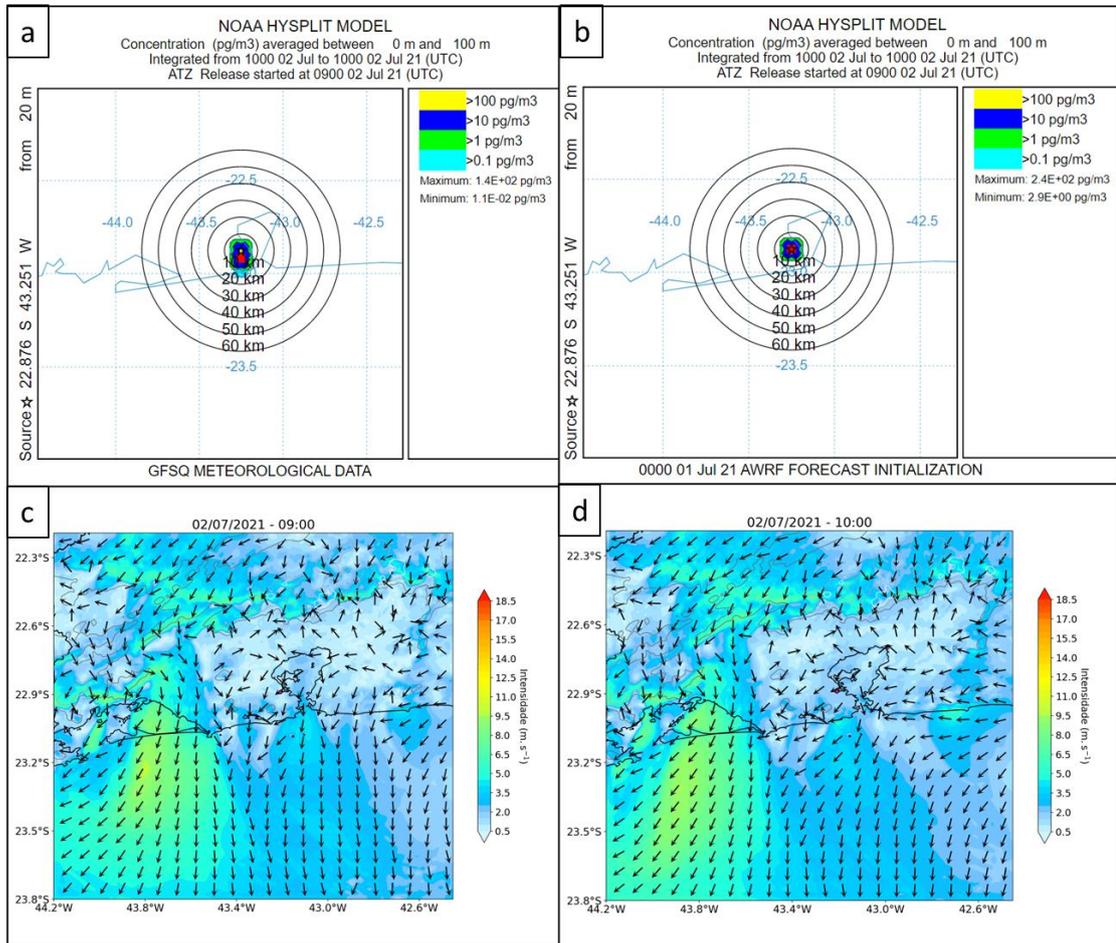
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 31: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



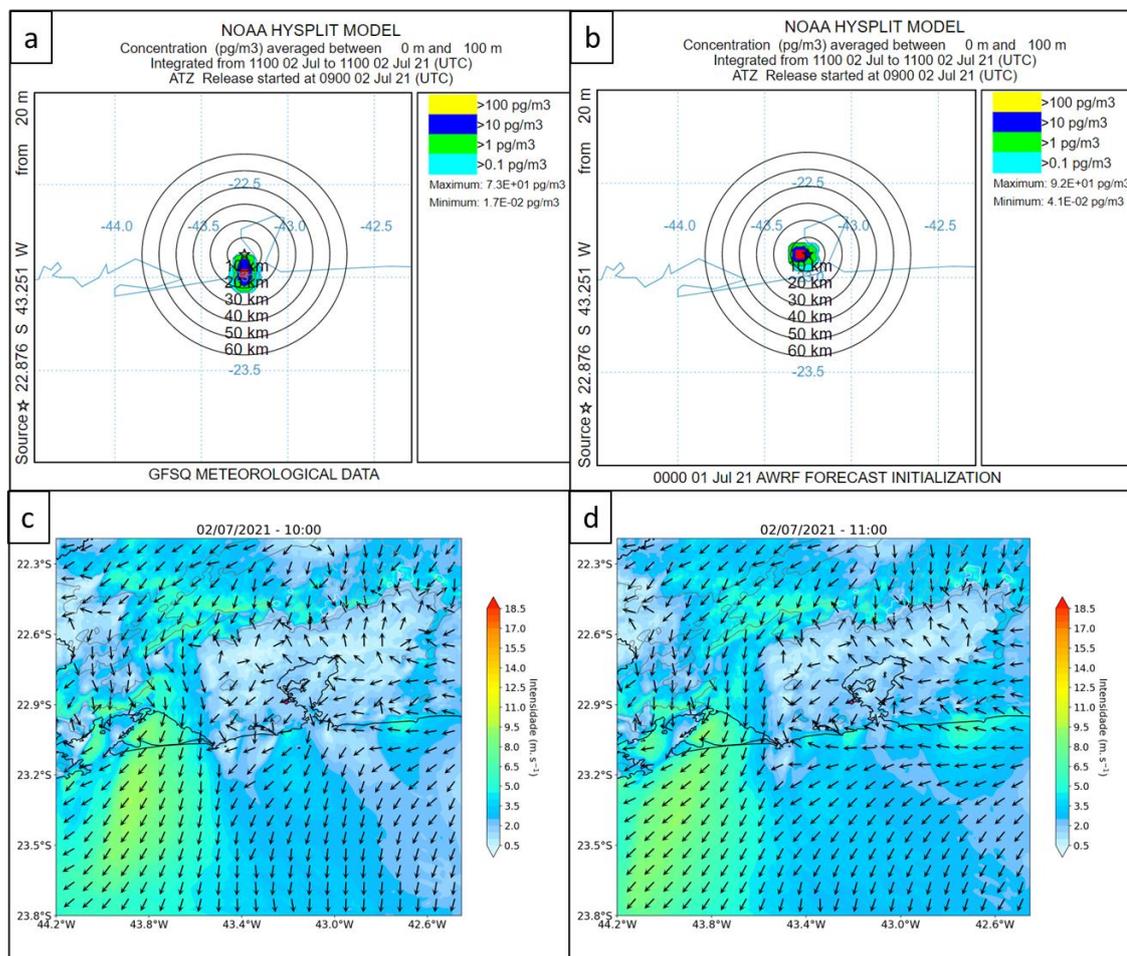
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 32: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 33: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 34: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.

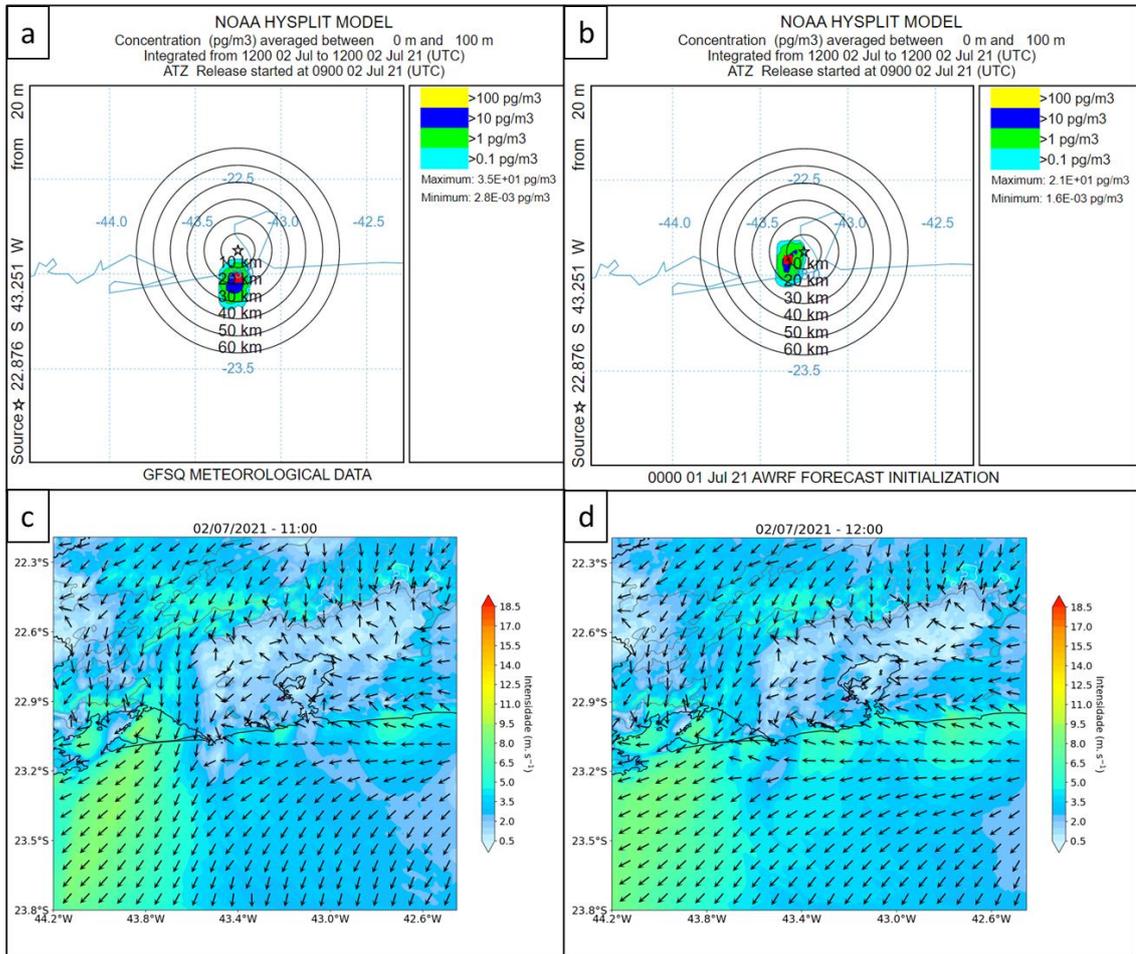
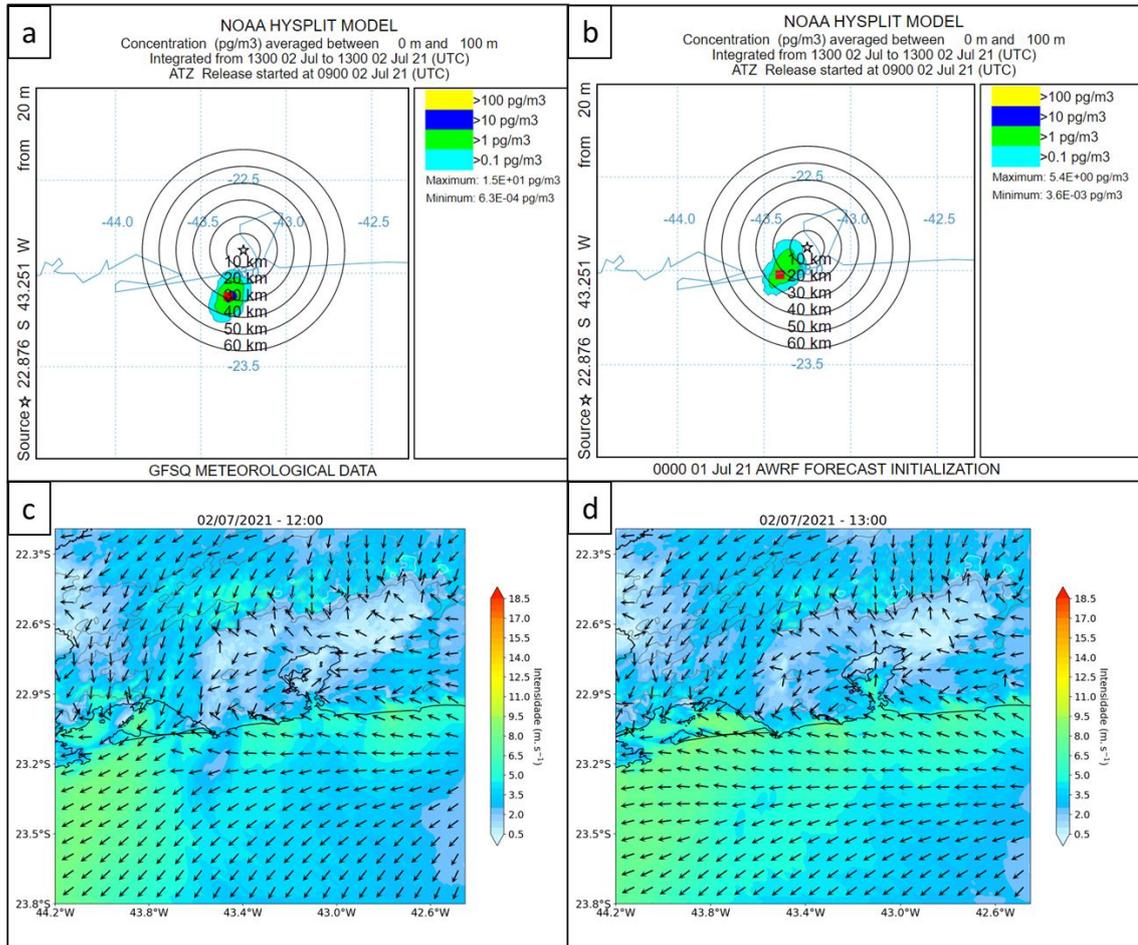
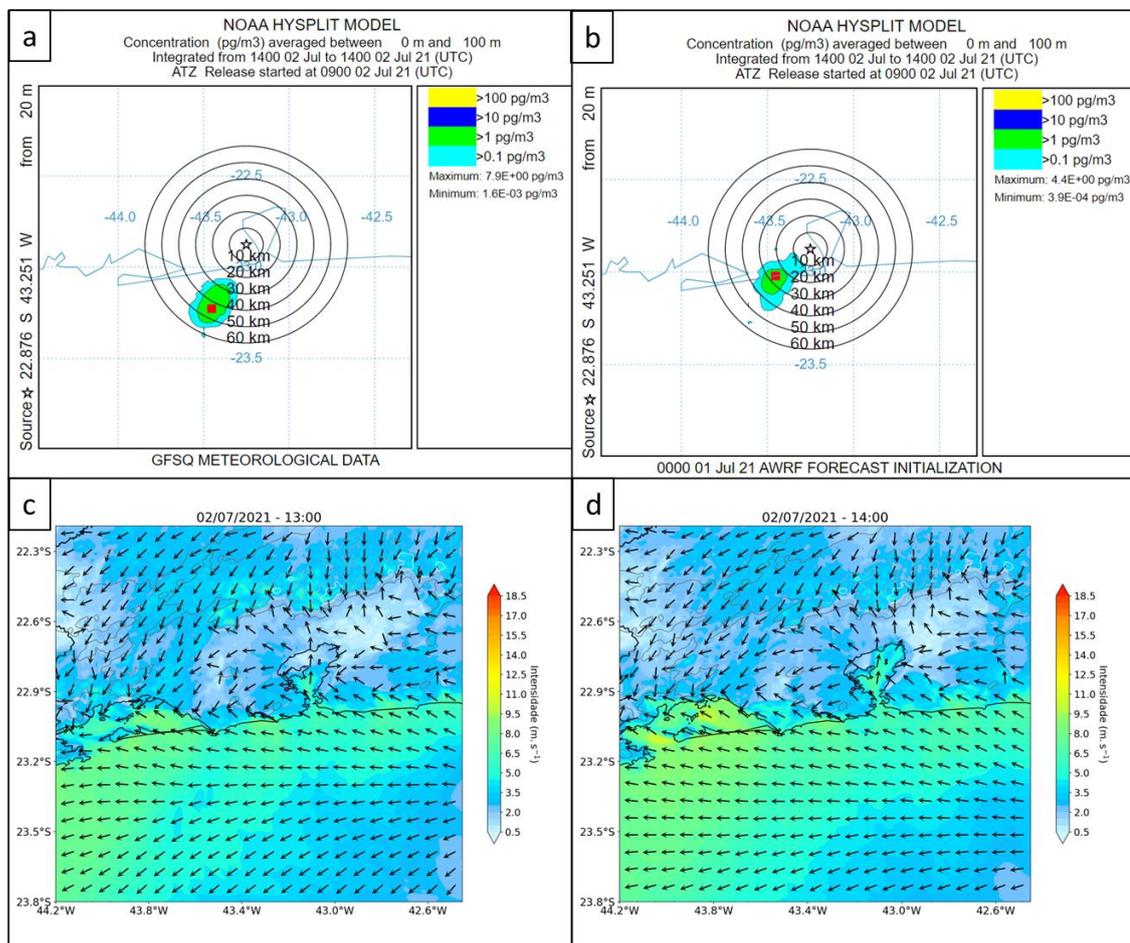


Figura 35: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



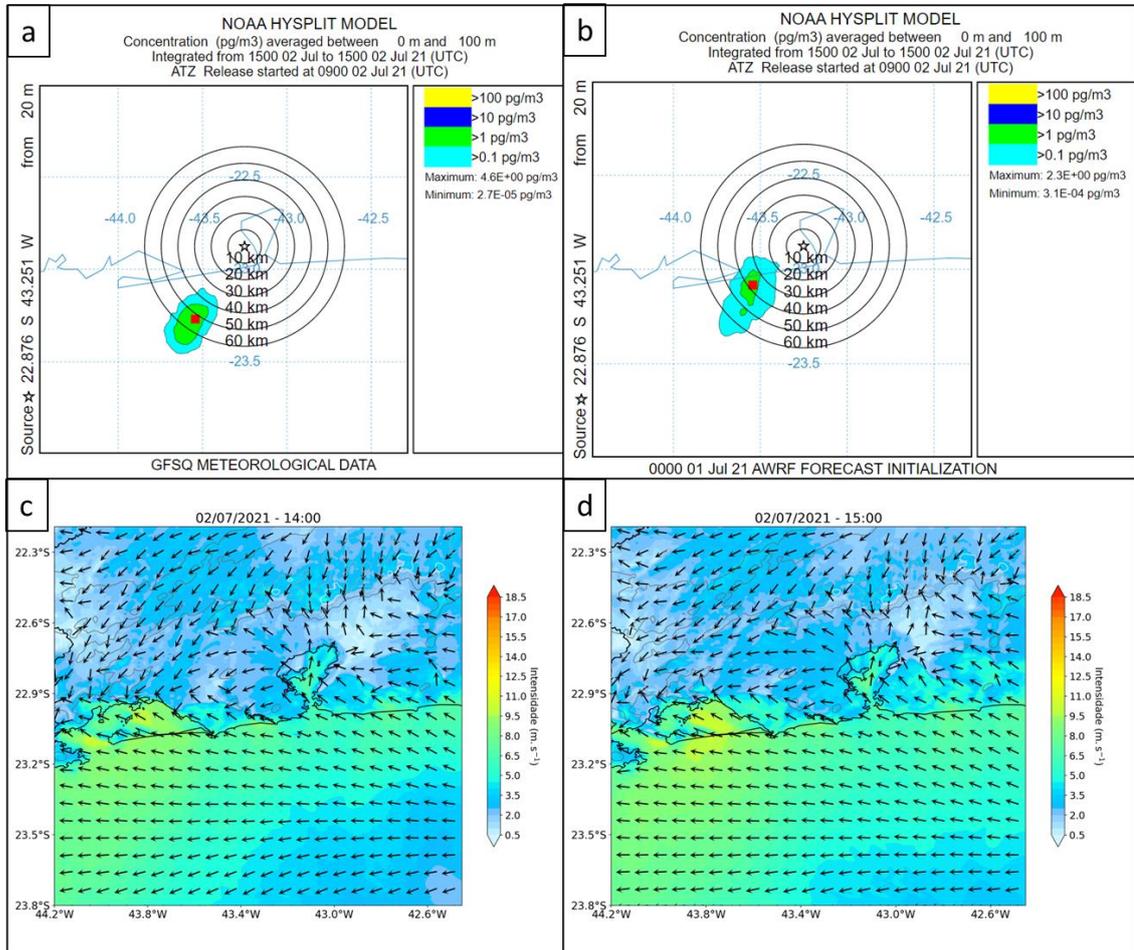
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 36: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



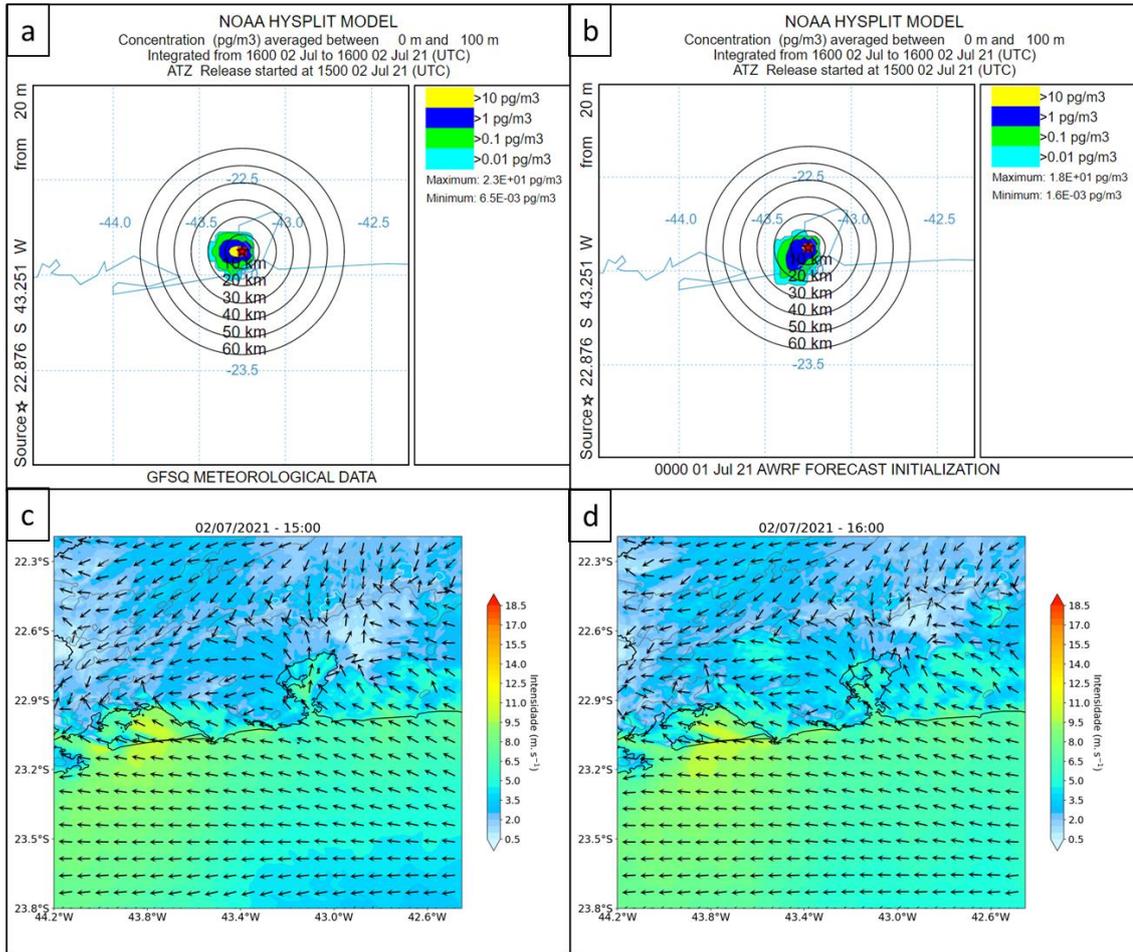
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 37: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



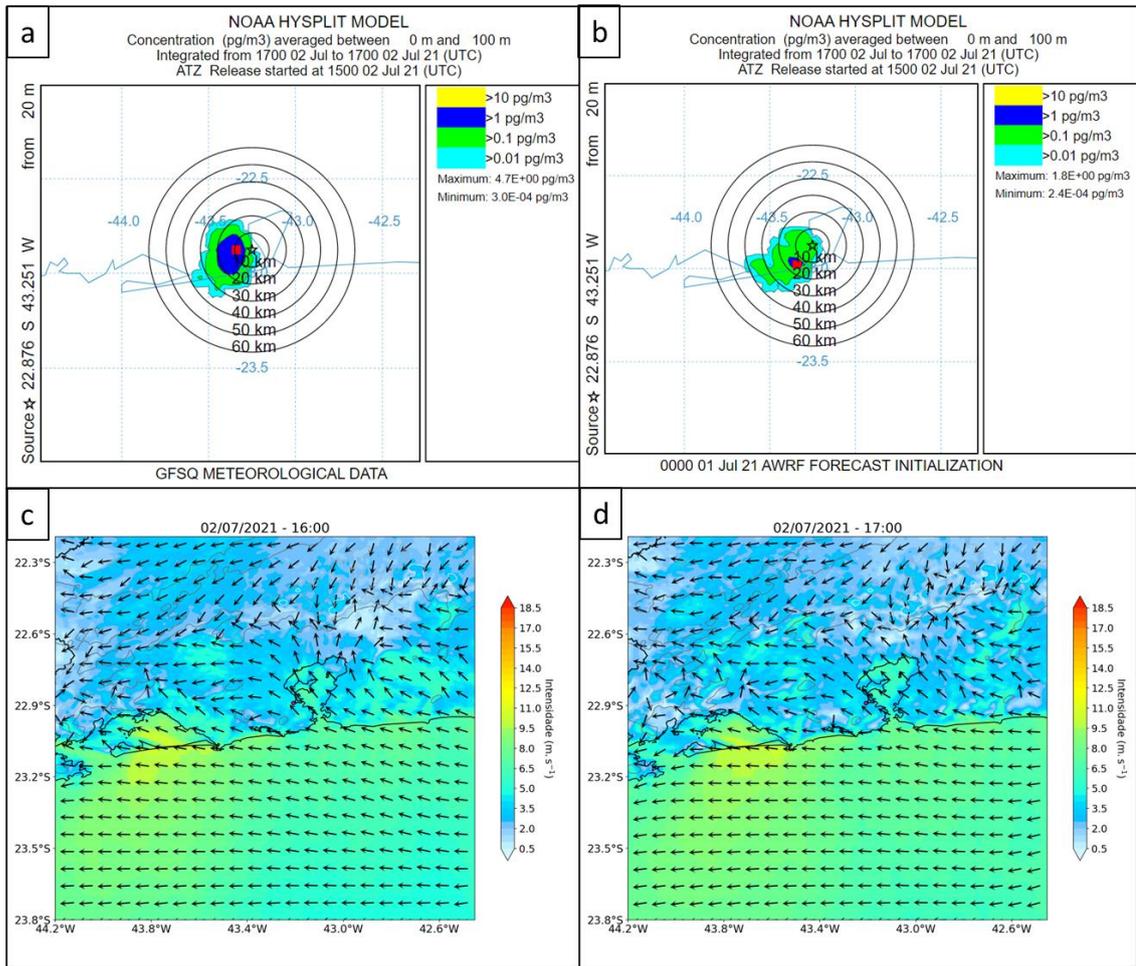
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 38: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



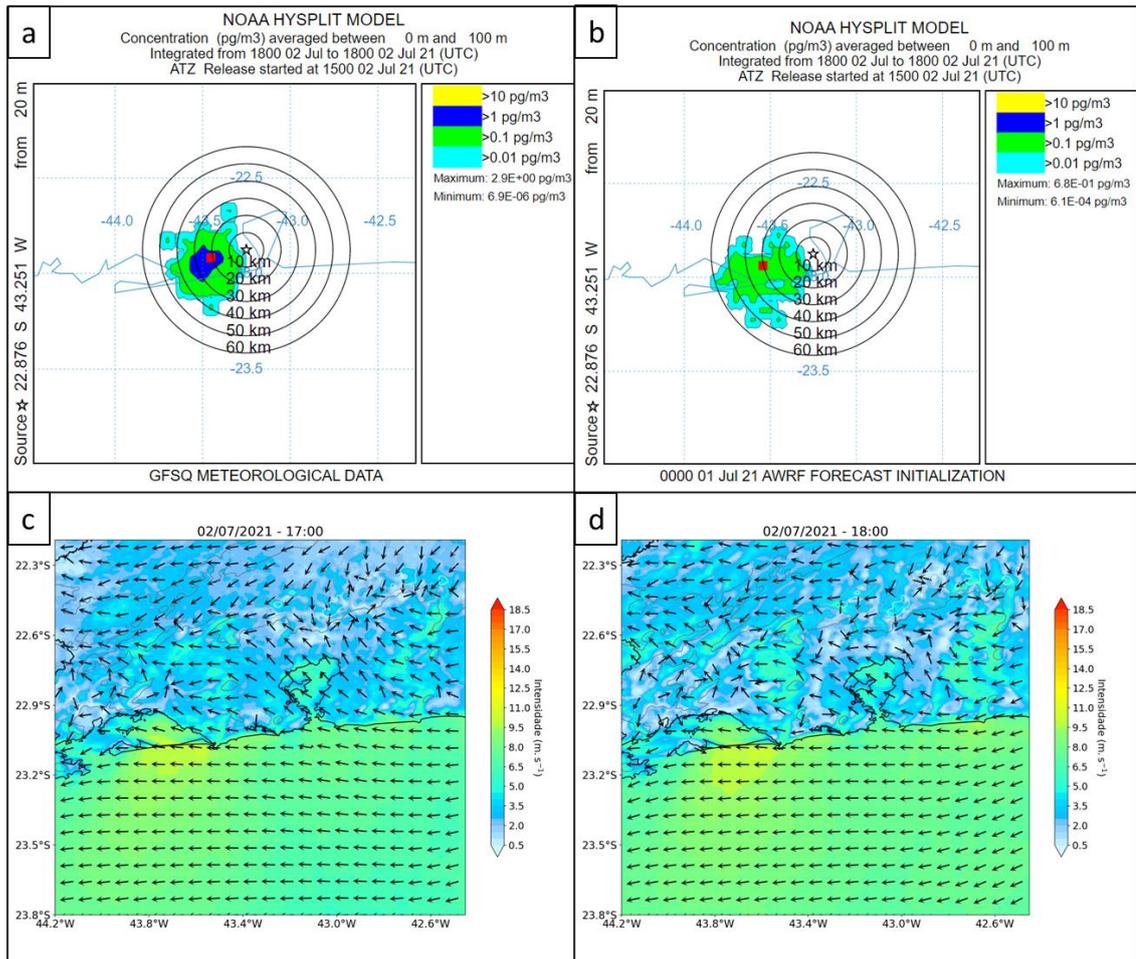
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 39: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



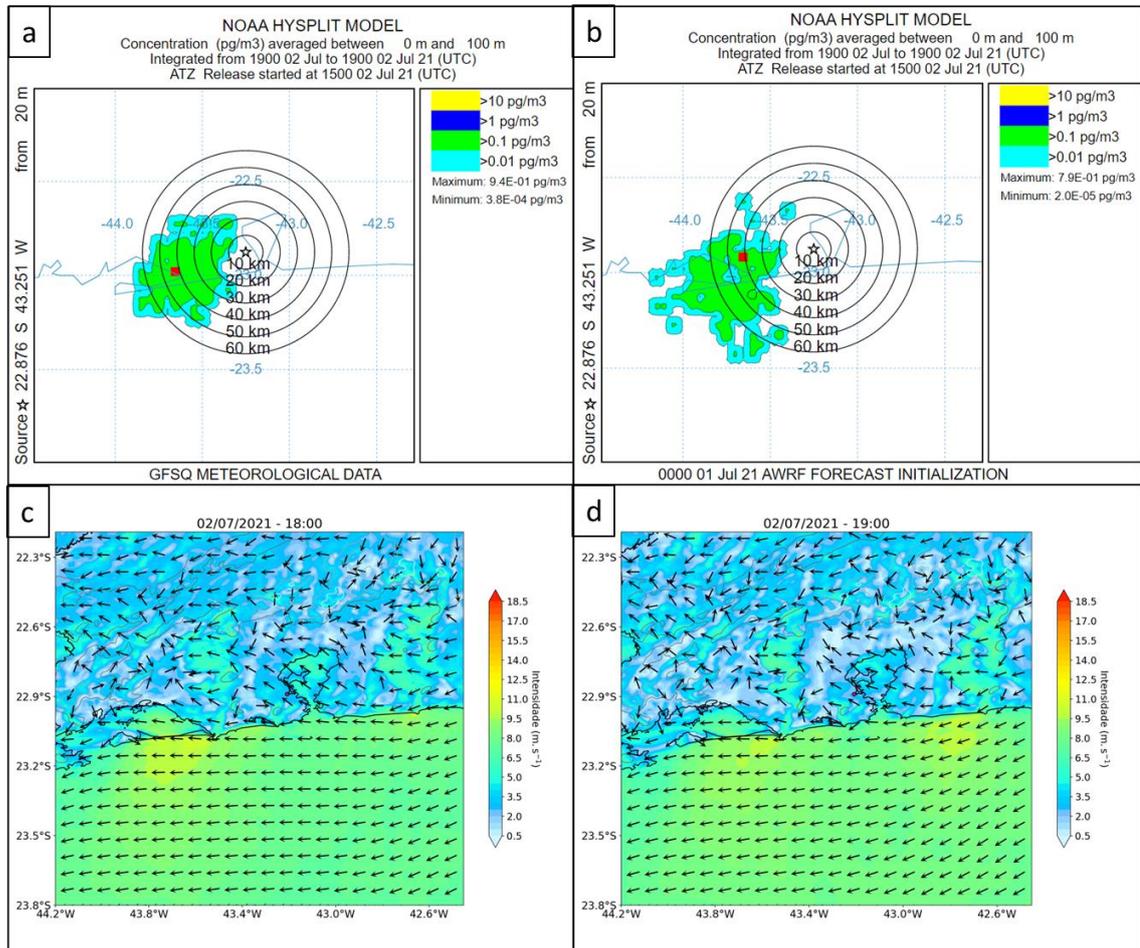
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 40: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 41: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 42: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.

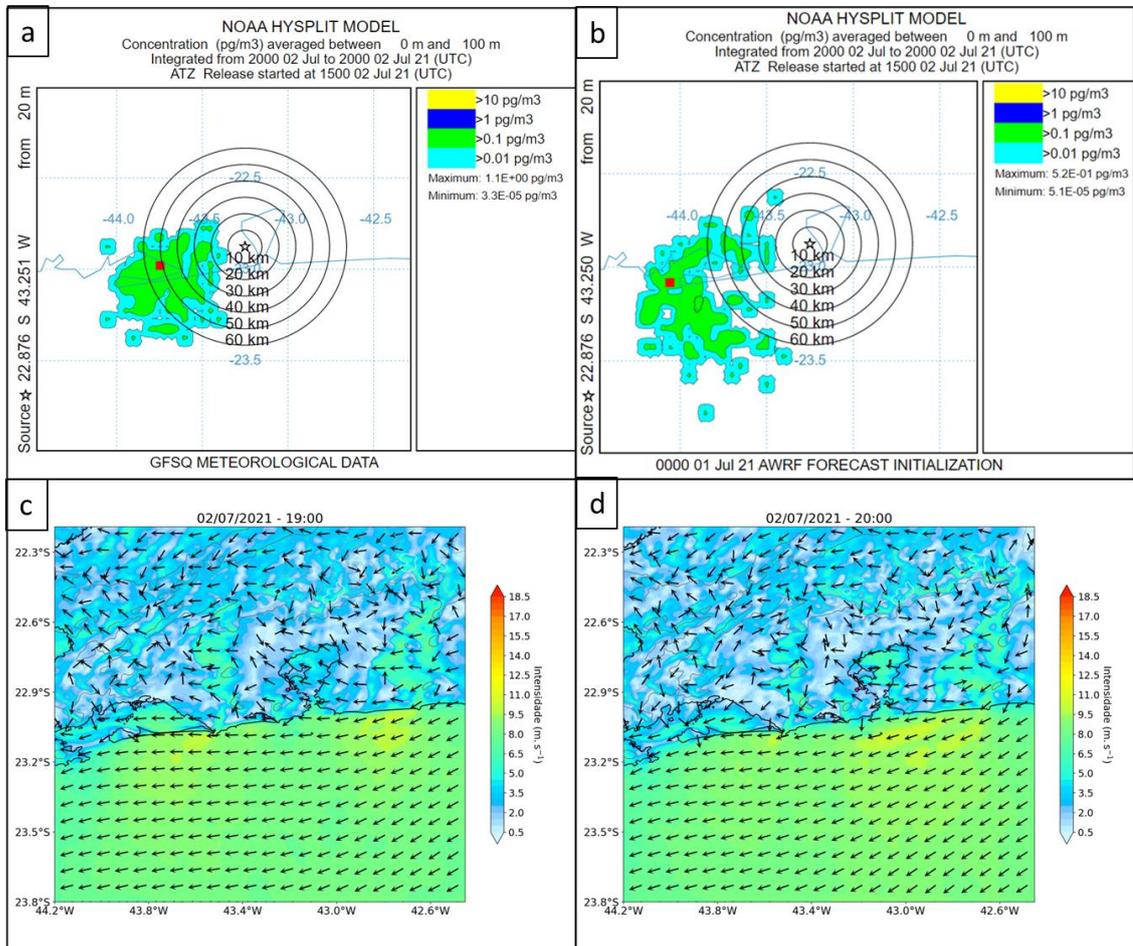
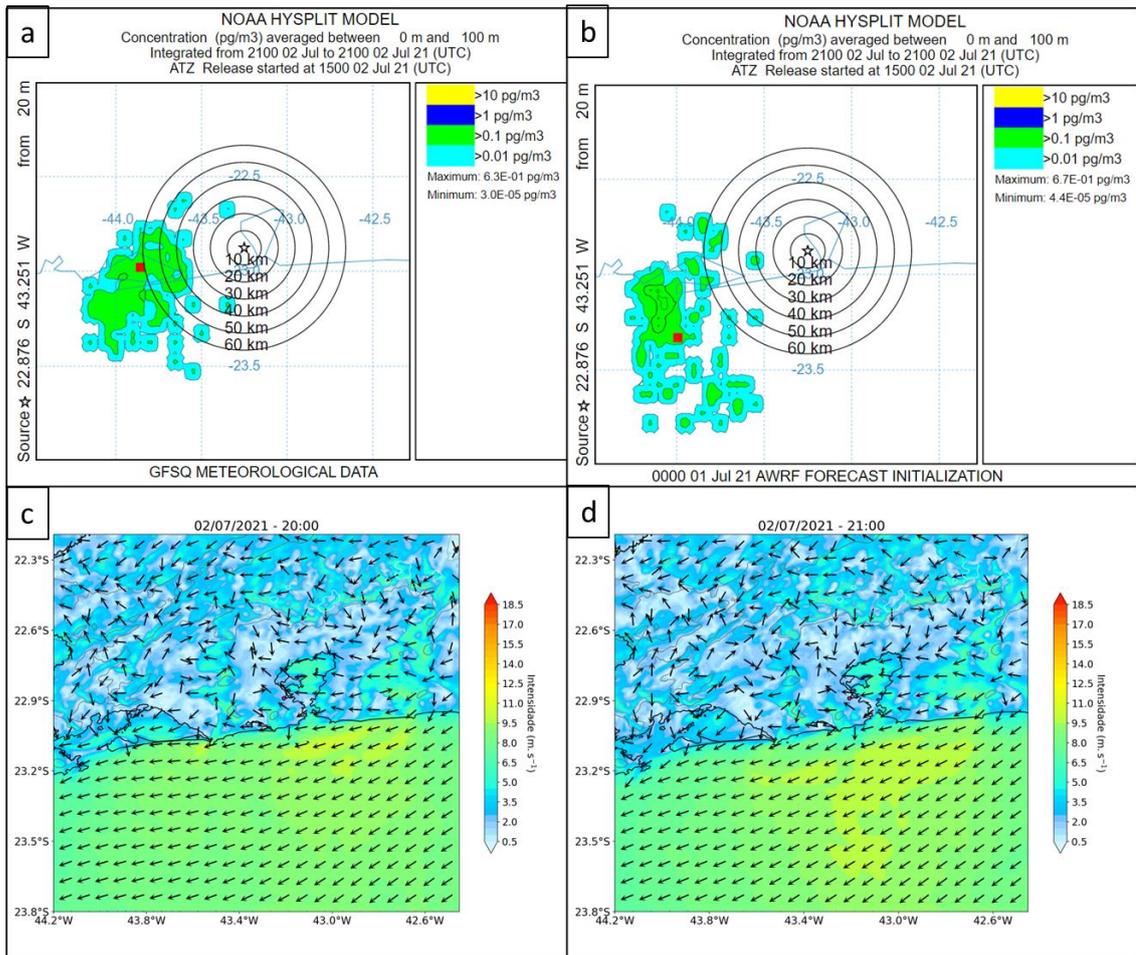
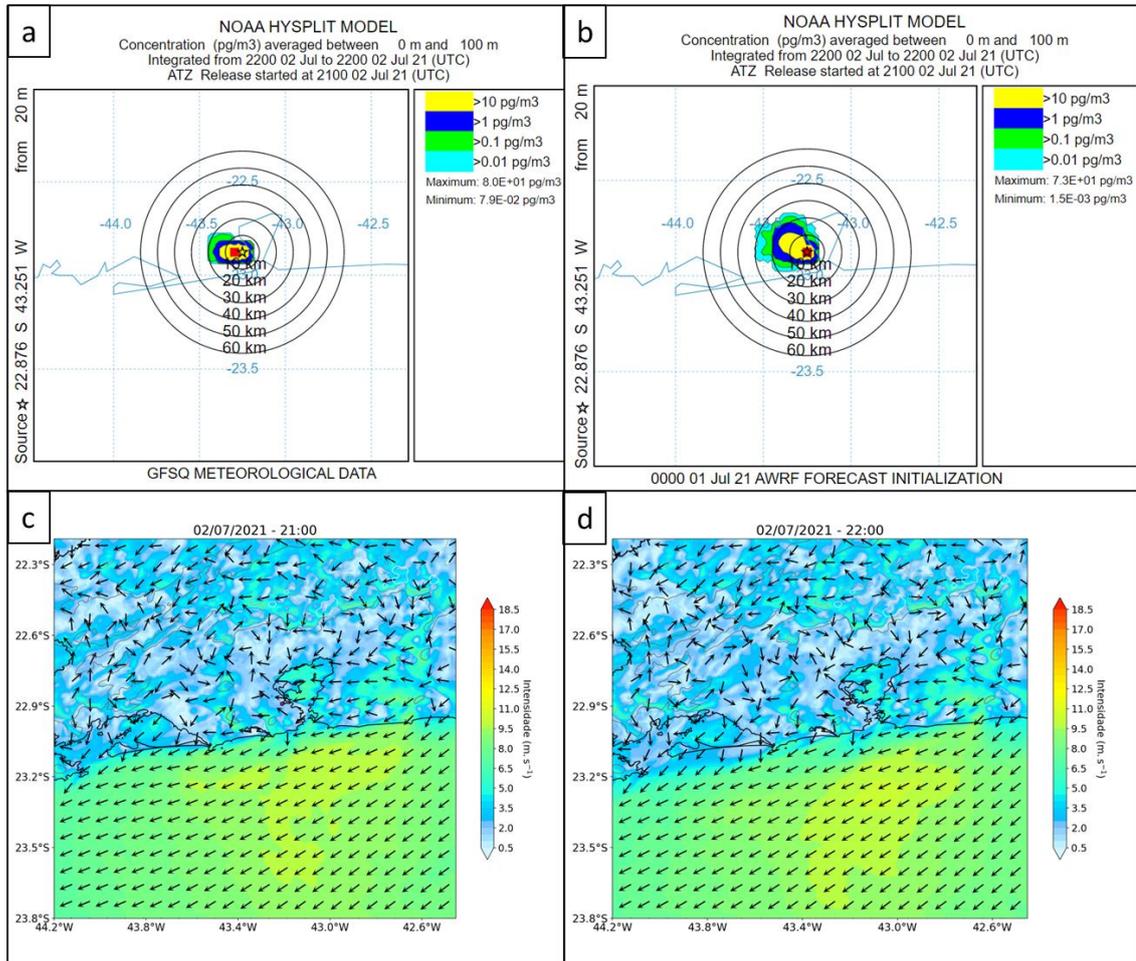


Figura 43: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



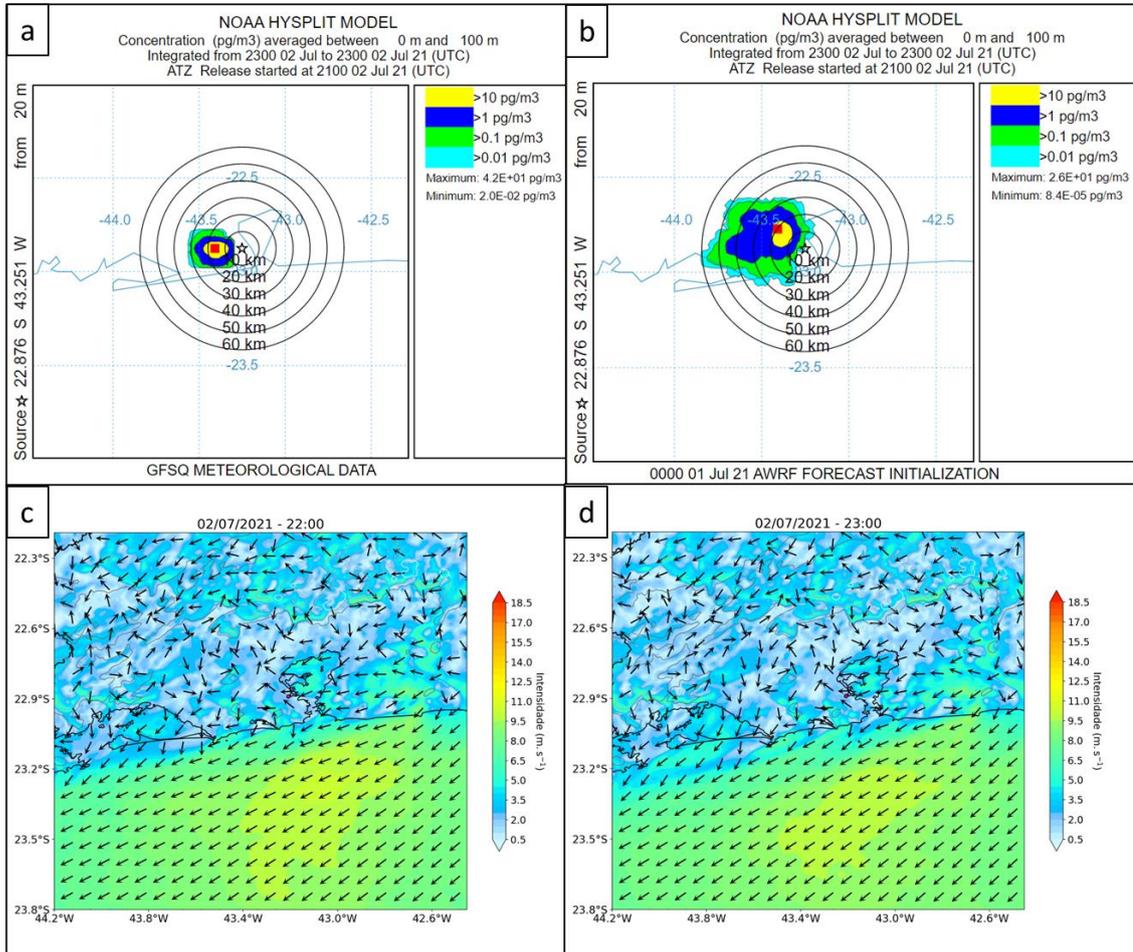
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 44: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



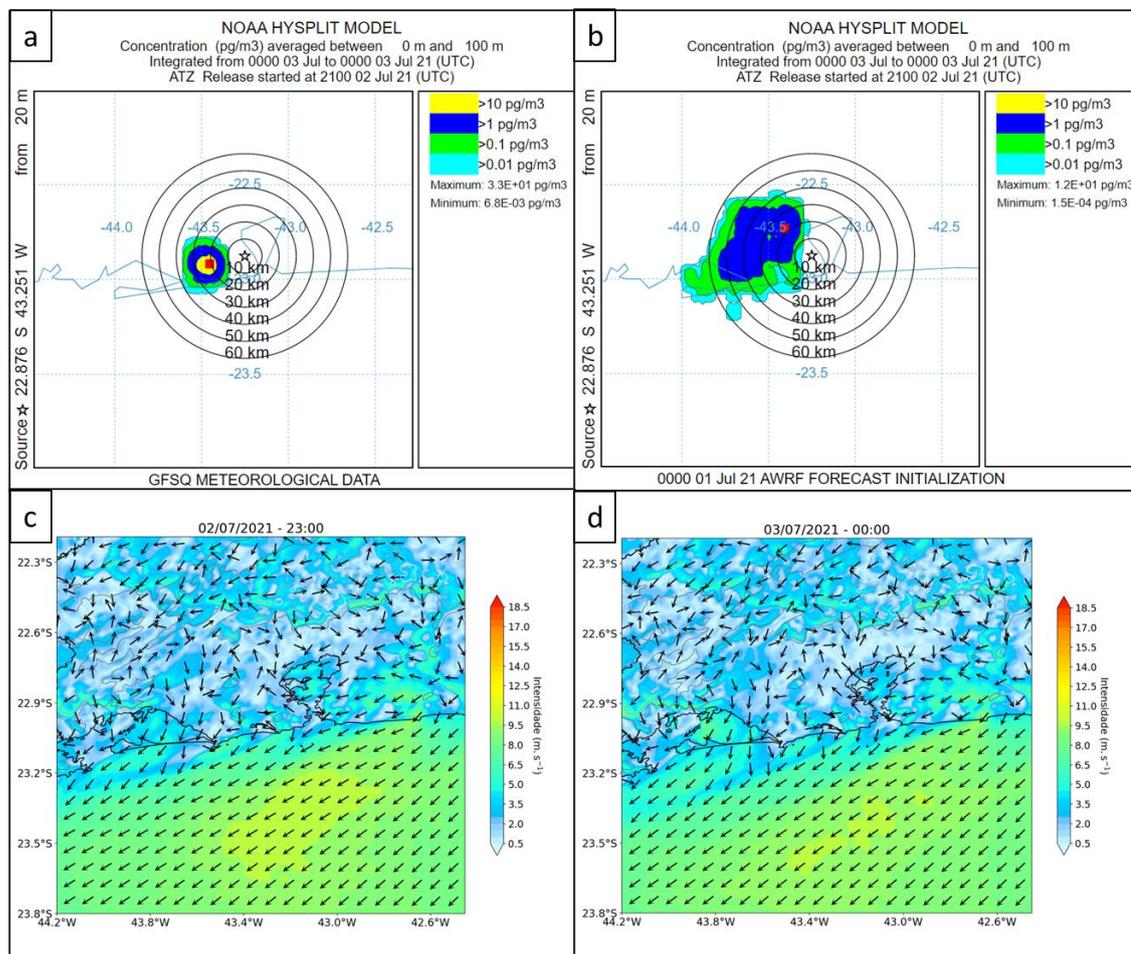
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 45: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 2 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 2 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



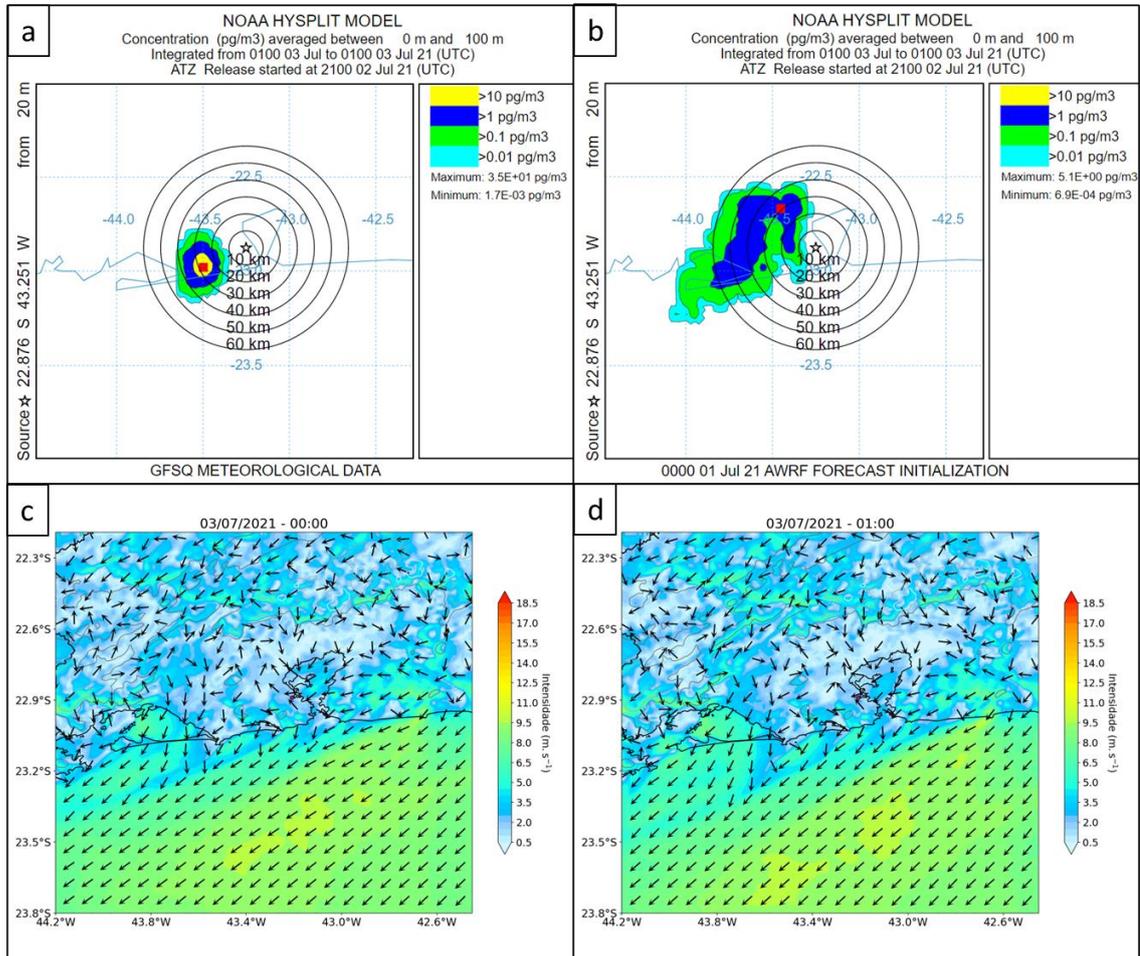
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 46: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 3 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 3 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



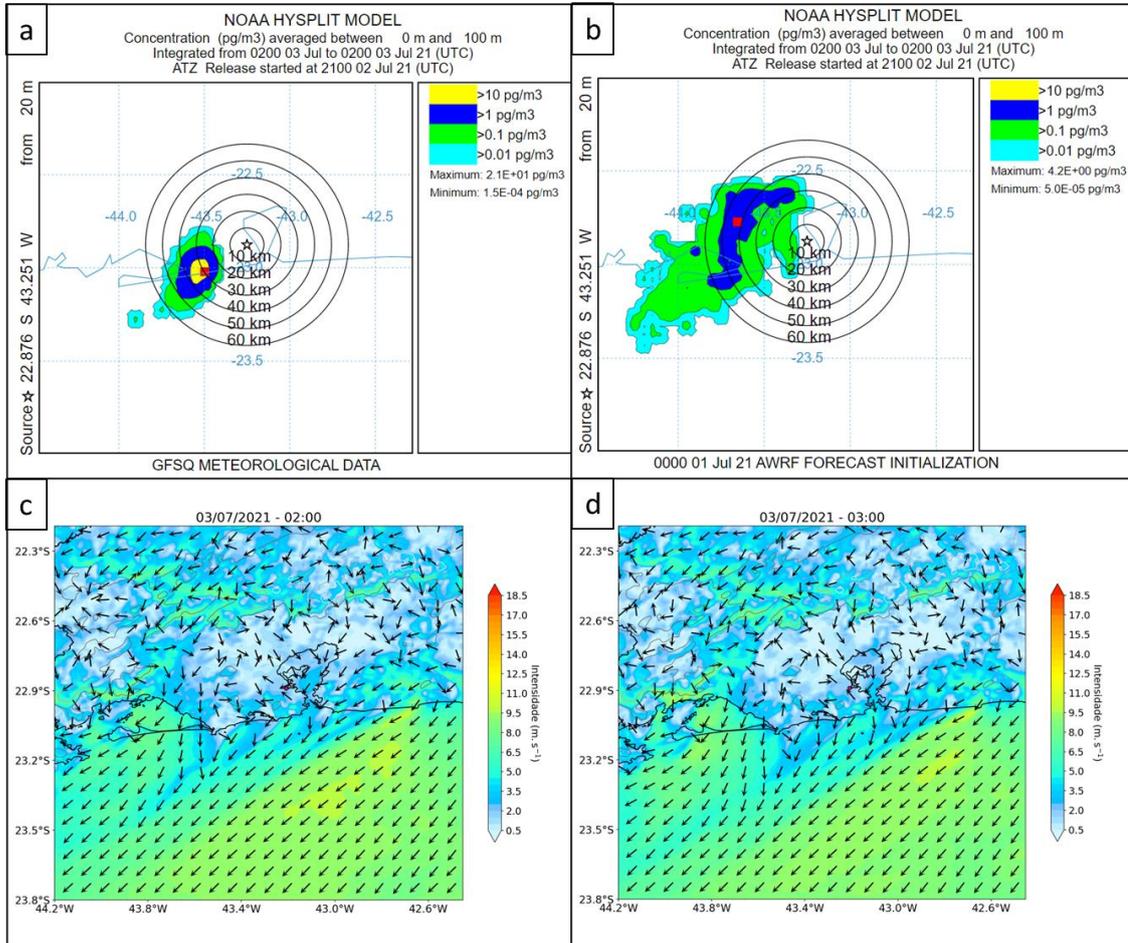
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 47: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 4 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 4 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



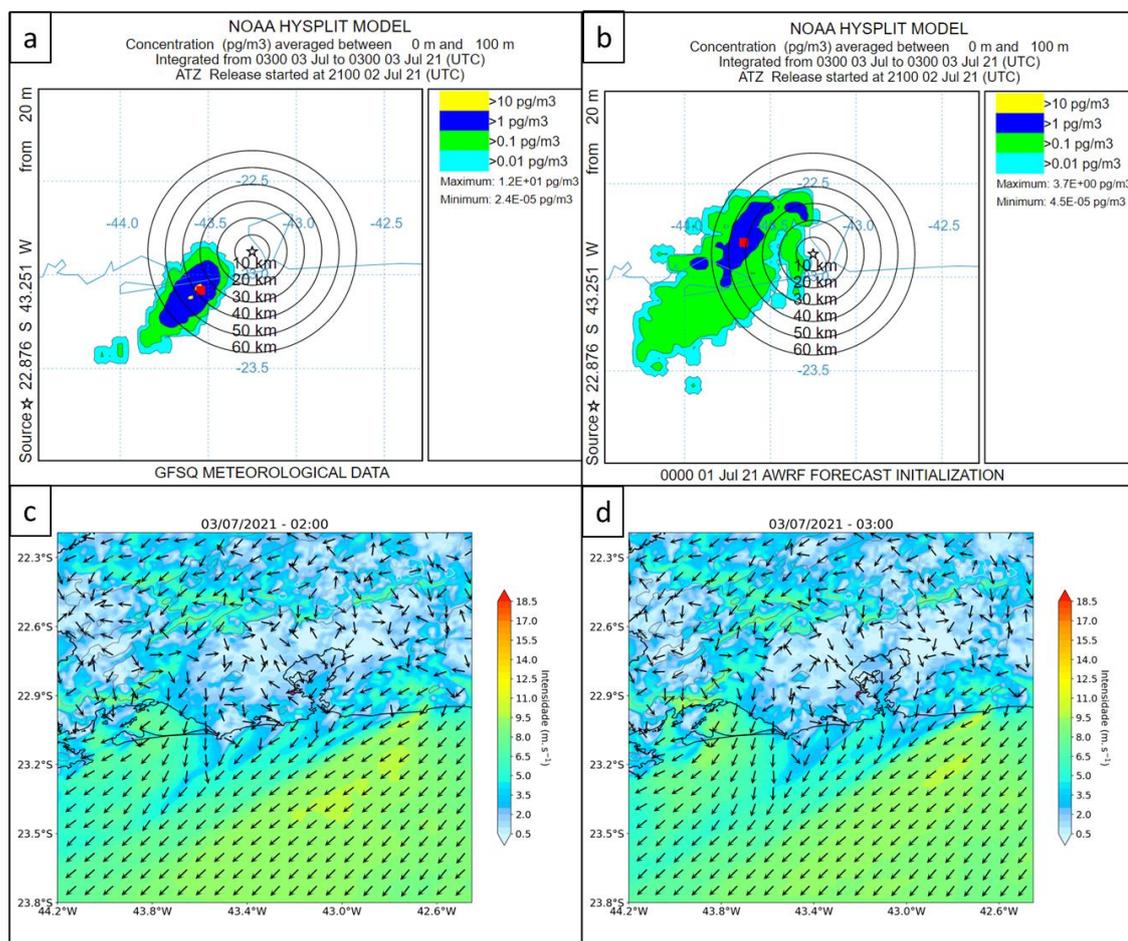
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 48: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 5 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 5 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

Figura 49: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 6 horas de liberação no GFS 0,25°; (b) após 6 horas de liberação no WRF 1 km; (c) e (d) campo de vento a 10 metros no intervalo da integração.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Modelo WRF 1 km.

As simulações das concentrações apresentam similaridade espacial frente ao perfil apresentado na comparação das simulações das trajetórias das massas aéreas (**Figuras 22 a 25**).

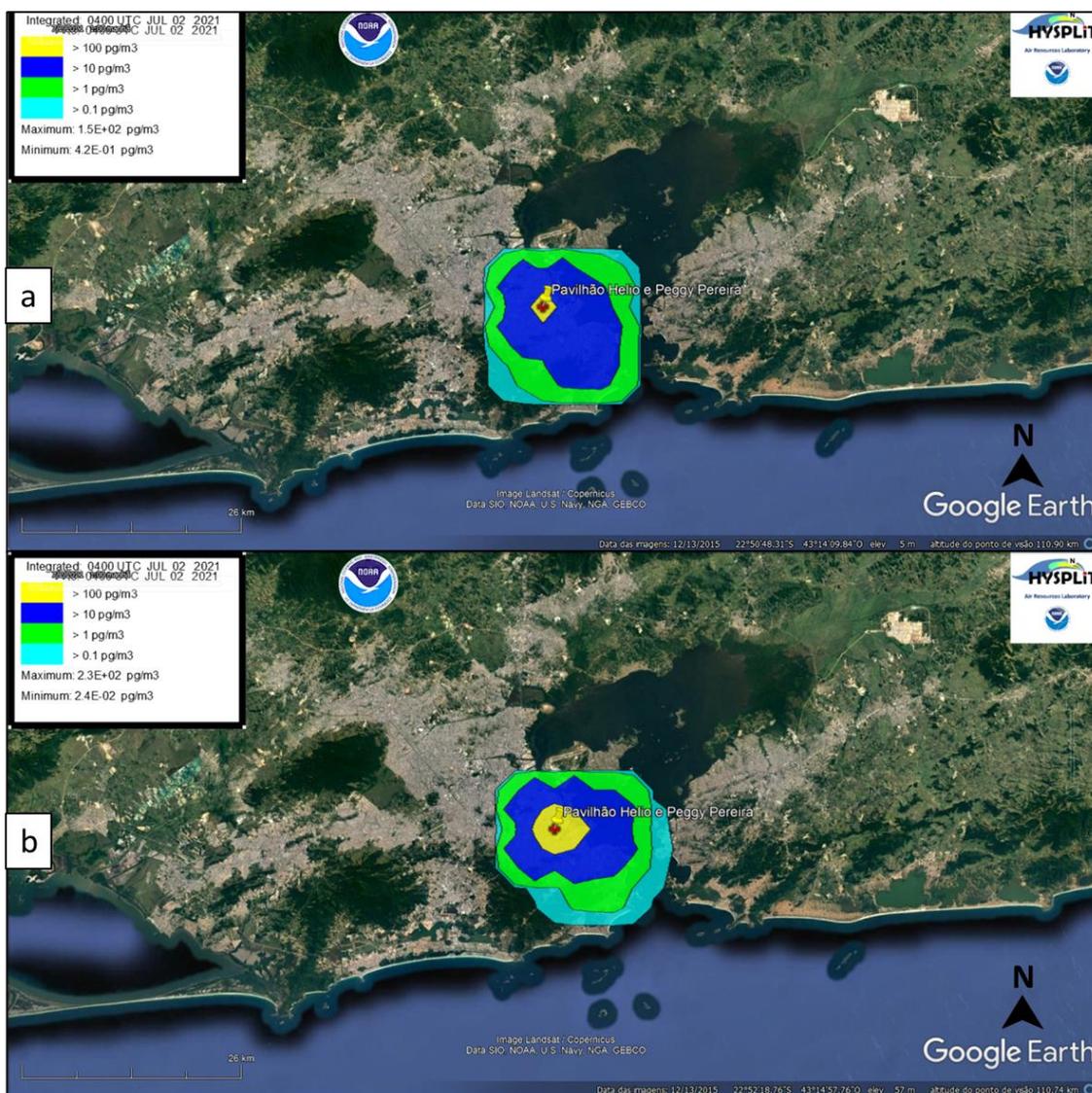
Assim como anteriormente observado na modelagem HYSPLIT-GFS 0,25°, o modelo HYSPLIT-WRF 1 km também inicia sua simulação com concentrações 10 vezes maiores de esporos de antraz nos períodos madrugada/manhã e manhã/tarde, quando comparado aos demais períodos analisados. Essa particularidade demonstra que o WRF 1 km é capaz de assimilar alterações relativas à dinâmica dos ventos da região.

Na maioria dos intervalos as plumas oriundas do modelo HYSPLIT-WRF 1 km apresentam-se com maior espalhamento espacial e com menor quantidade de partículas acumuladas (plumas mais diluídas). Constata-se que essas plumas conseguem representar melhor as variações de sentido e velocidade dos ventos a 10 m, quando comparadas as do modelo HYSPLIT-GFS 0,25°, provavelmente essa característica está relacionada a melhor

resolução dos dados meteorológicos.

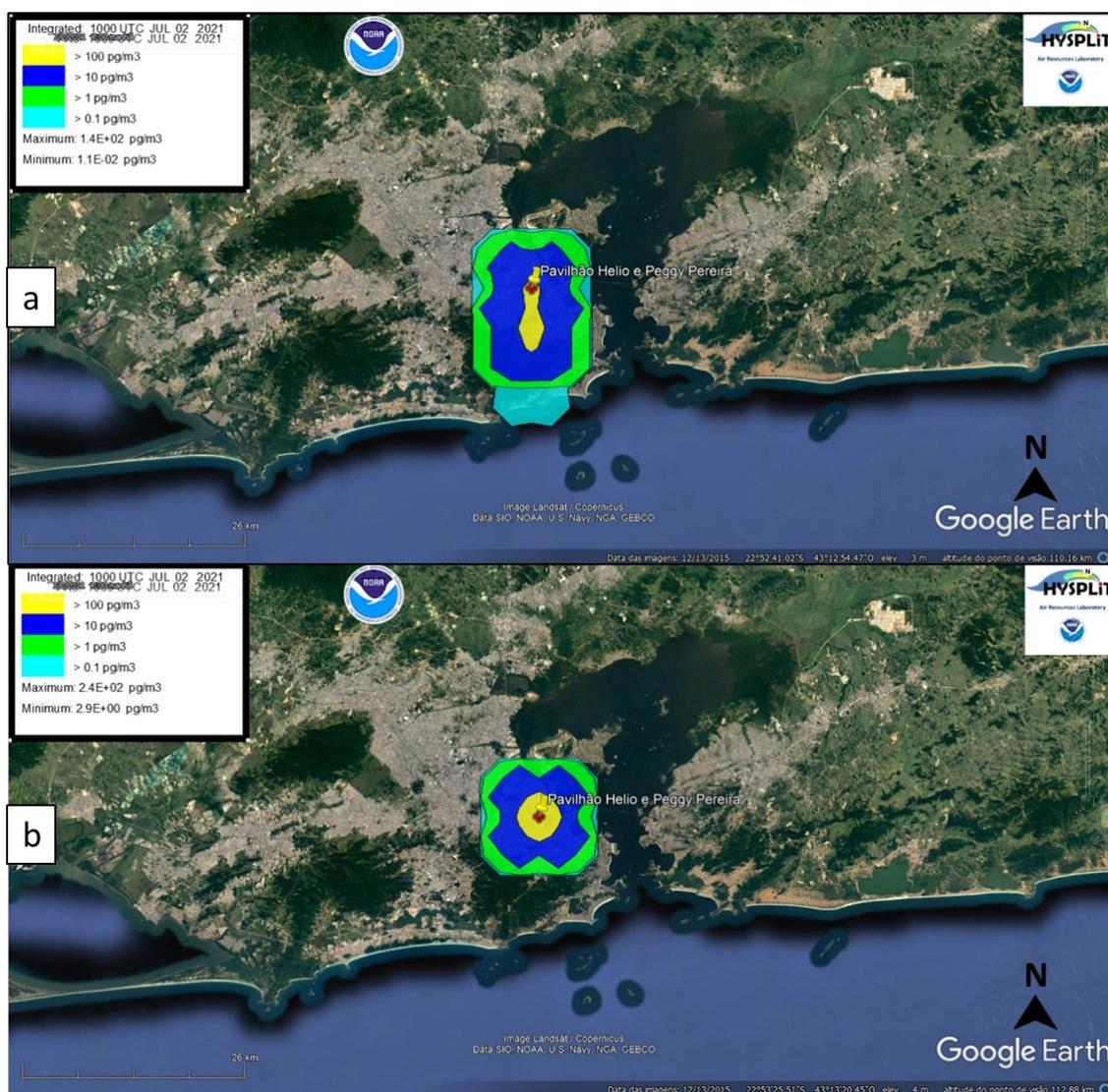
As **Figuras 50 a 53** apresentam as comparações espaciais das simulações das concentrações HYSPLIT-GFS 0,25° *versus* HYSPLIT-WRF 1 km, com direção *forward*, executadas a partir do momento de liberação dos esporos de antraz nos distintos períodos do dia durante a primeira hora de cada corrida.

Figura 50: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da madrugada/manhã, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.



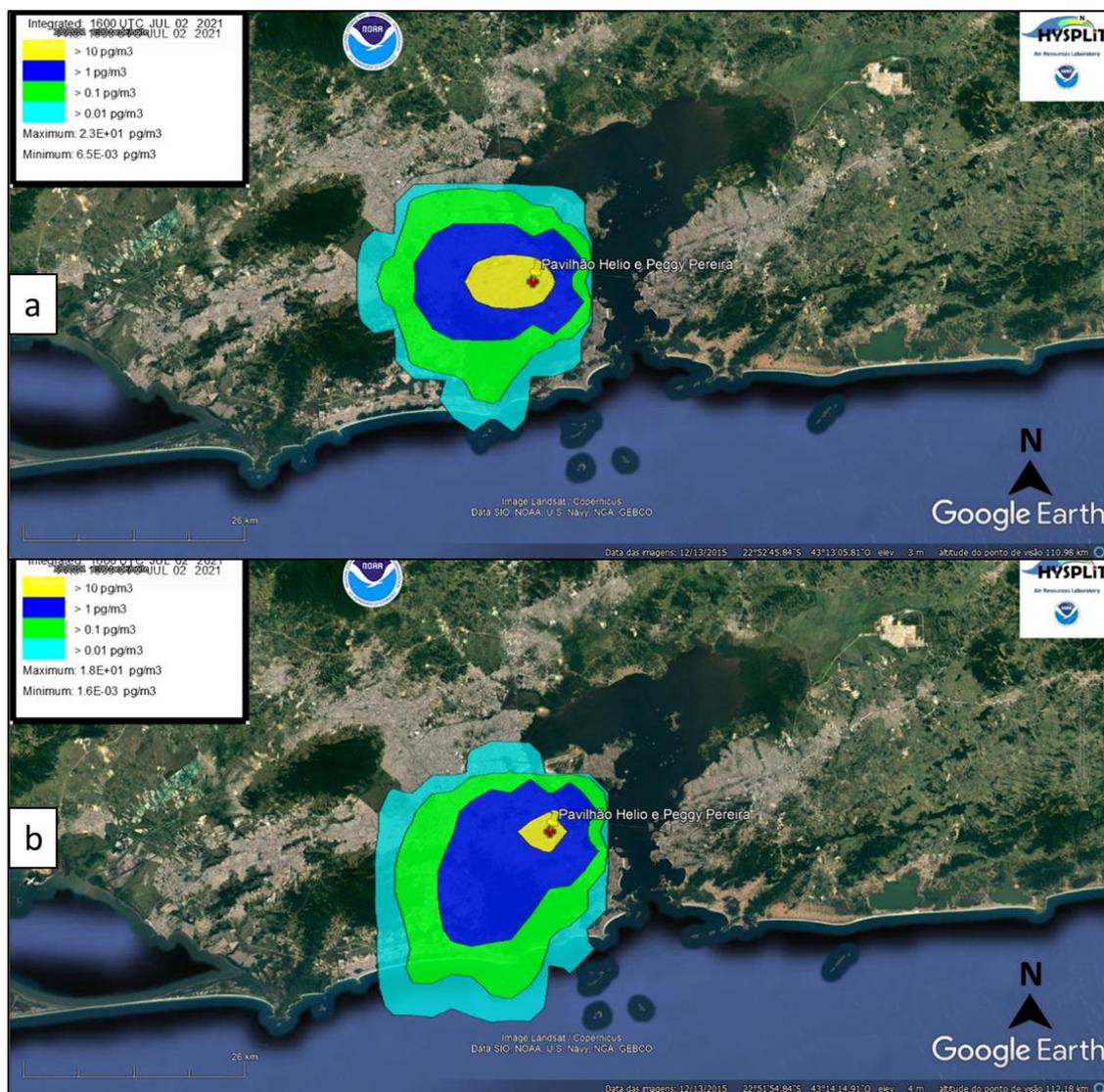
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 51: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da manhã/tarde, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.



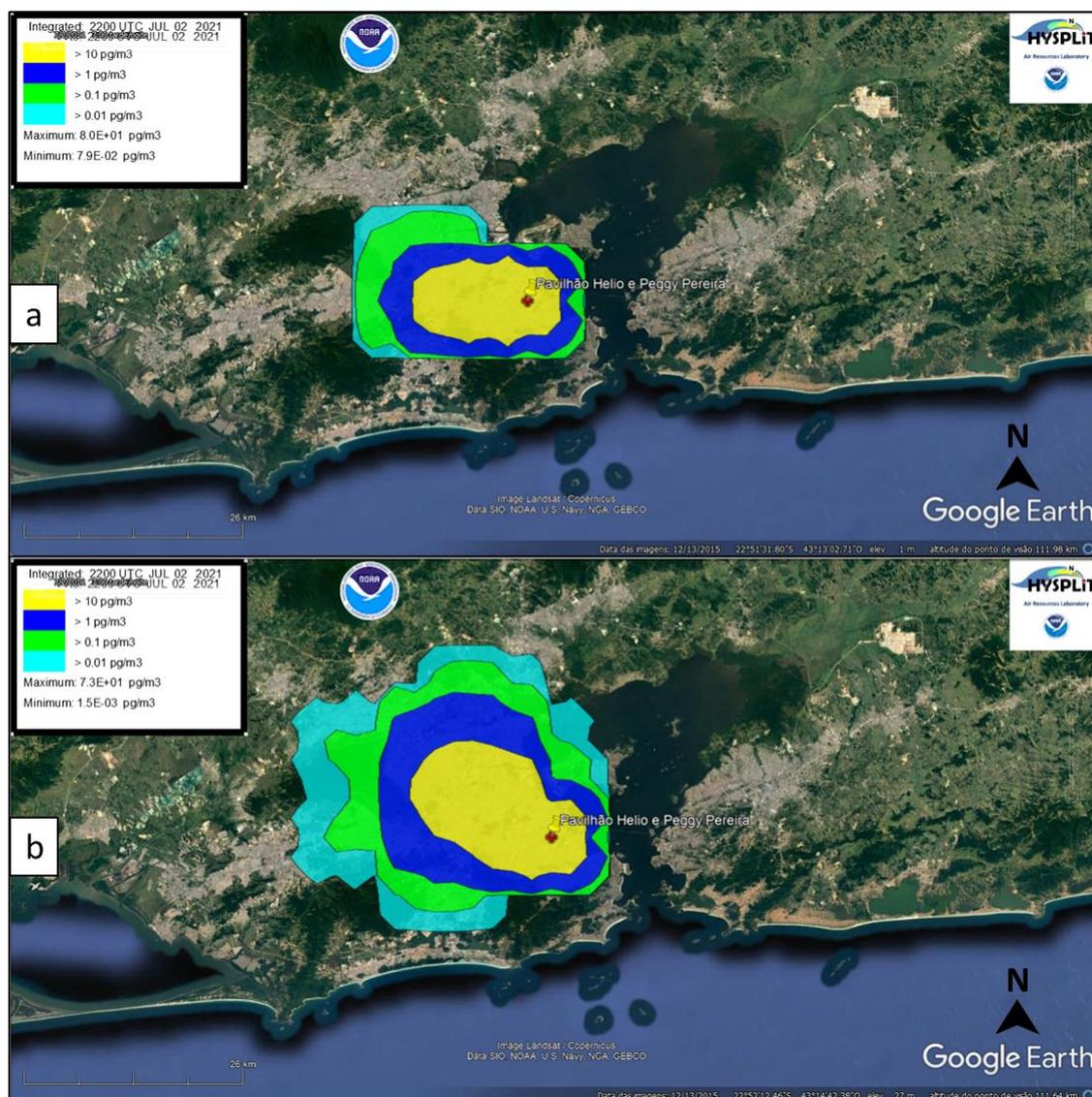
Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 52: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da tarde/noite, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e *Google Earth*.

Figura 53: Concentração das partículas de antraz do episódio de liberação referente ao período da noite/madrugada, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil. (a) após 1 hora de liberação no GFS 0,25°; (b) após 1 hora de liberação no WRF 1 km.



Fonte: Elaboração própria – Modelo HYSPLIT e Google Earth.

Essas simulações apresentam boa concordância espacial dentro da primeira hora de execução. Sendo assim, mesmo que o HYSPLIT-GFS 0,25° possua resolução espacial e temporal mais grosseira, por ter uma execução computacional mais simples e célere, considera-se que ele possa ser uma ferramenta útil no delineamento das primeiras previsões do evento.

Dados meteorológicos

A Tabela 6 apresenta o perfil dos parâmetros meteorológicos relacionados a temperatura, direção e velocidade do vento e pressão oriundos das simulações HYSPLIT-GFS

0,25° e HYSPLIT-WRF 1 km, além dos dados observados na EASC e nos aeródromos SBGL e SBRJ.

Durante o período analisado alguns dados não foram mensurados, como no caso da modelagem HYSPLIT-GFS 0,25° que possui resolução temporal de 3 h e no SBRJ em que as medições compreendem apenas o período das 9 h da manhã até às 2 h da madrugada. Essa condição sinaliza uma limitação do estudo e a necessidade da realização de estudos mais aprofundados, contendo uma série de dados mais ampla.

Tabela 6: Dados meteorológicos oriundos do HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS), do HYSPLIT-WRF 1 km (WRF), da Estação Automática de São Cristovão (EASC), do Aeroporto Galeão (SBGL) e do Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.

DATA/HORA	TEMPERATURA (°C)					DIREÇÃO DO VENTO (°)					VELOCIDADE DO VENTO (m/s)					PRESSÃO ATMOSFÉRICA (hPa)				
	GFS	WRF	EASC	SBGL	SBRJ	GFS	WRF	EASC	SBGL	SBRJ	GFS	WRF	EASC	SBGL	SBRJ	GFS	WRF	EASC	SBGL	SBRJ
02072021/03:00	16,6	16,7	15,5	15		311,0	270,0	-	VRB		1,8	1,3	0,0	1,0		1019	1024	1021	1026	
02072021/04:00		16,3	15,2	15			329,0	-	330			1,1	0,0	2,1			1023	1021	1026	
02072021/05:00		15,9	15,2	14			206,1	-	330			0,8	0,0	2,1			1023	1021	1026	
02072021/06:00	16,1	16,1	15,1	14		336,8	185,8	-	340		2,0	1,4	0,0	2,1		1018	1023	1022	1025	
02072021/07:00		15,6	14,8	13			289,9	-	VRB			1,1	0,0	1,0			1023	1022	1025	
02072021/08:00		15,3	17,1	12			280,8	-	30			1,1	0,0	1,5			1023	1022	1026	
02072021/09:00	15,5	14,9	19,0	12	16	6,5	225,0	-	50	20	2,1	0,4	0,0	1,5	3,6	1019	1023	1023	1026	1025
02072021/10:00		14,7	20,1	13	16		78,5	136	40	10		0,6	8,8	1,0	3,1		1024	1022	1026	1026
02072021/11:00		16,7	20,8	15	17		79,8	122	20	350		0,6	6,4	1,5	3,1		1025	1022	1027	1026
02072021/12:00	17,4	18,7	22,7	18	17	12,5	47,2	99	49	340	2,3	0,9	8,1	1,0	3,1	1020	1025	1020	1027	1026
02072021/13:00		20,3	23,6	18	18		71,9	-	VRB	10		1,8	0,0	1,0	3,1		1024	1019	1027	1026
02072021/14:00		21,7	23,0	20	19		69,5	-	350	350		1,9	0,0	1,5	2,3		1023	1019	1026	1026
02072021/15:00	20,0	23,1	23,1	22	21	83,4	75,4	245	260	150	2,9	2,3	11,6	1,5	2,3	1017	1022	1019	1025	1025
02072021/16:00		23,4	22,4	23	22		62,2	241	300	170		3,0	9,5	1,5	5,1		1022	1018	1024	1024
02072021/17:00		23,1	22,4	23	22		126,6	235	100	160		3,6	5,3	2,1	6,2		1021	1019	1023	1023
02072021/18:00	21,0	22,5	21,4	23	22	99,1	133,1	-	130	160	3,7	4,2	0,0	3,6	6,2	1017	1020	1019	1023	1022
02072021/19:00		22,0	21,8	22	22		133,4	-	130	160		4,5	0,0	3,6	5,7		1021	1019	1023	1023
02072021/20:00		21,1	20,3	21	22		131,5	-	120	170		3,5	0,0	3,1	4,1		1021	1019	1023	1022
02072021/21:00	20,1	20,3	20,2	20	21	82,8	125,6	102	150	150	4,4	2,9	9,5	2,3	2,1	1017	1021	1019	1023	1022
02072021/22:00		19,9	19,4	20	22		124,8	-	110	VRB		2,7	0,0	3,1	1,5		1022	1019	1023	1023
02072021/23:00		19,3	18,6	18	21		158,7	-	90	110		2,0	0,0	1,5	2,3		1022	1019	1024	1023
03072021/00:00	19,3	19,0	18,3	18	20	52,3	161,6	-	110	VRB	3,5	2,0	0,0	2,3	1,0	1016	1022	1019	1023	1023
03072021/01:00		18,5	18,1	17	20		180,0	-	140	340		1,8	0,0	2,1	2,1		1022	1019	1024	1023
03072021/02:00		18,2	17,6	16	19		176,6	-	60	320		2,1	0,0	1,5	1,5		1021	1018	1024	1023
03072021/03:00	18,2	17,9	17,7	16		3,7	184,1	-	340		1,7	2,2	0,0	1,0		1017	1021	1018	1023	

Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 7** expõe a análise do desempenho entre os modelos HYSPLIT-GFS 0,25° e HYSPLIT-WRF 1 km baseada na comparação dos índices COR, EQMN, EAM, BIAS, Fb e Fs entre os dados simulados e os dados observados na EASC e nos aeródromos SBGL e SBRJ de acordo com os dados apresentados na **Tabela 6**. Todos os índices possuem como melhor valor o número 0, com exceção do índice COR que o valor ideal é o mais próximo de 1. No índice BIAS valores maiores que 0 indicam superestimação do modelo e valores abaixo de 0 indicam subestimação, já no índice Fb os valores positivos apontam subestimação e os valores negativos superestimação do modelo.

Tabela 7: Comparação estatística dos índices de correlação (COR), do erro quadrático médio normalizado (EQMN), do erro absoluto médio (EAM), do erro médio (BIAS), do desvio fracional (Fb) e desvio fracional padrão (Fs) entre os dados simulados pelo HYSPLIT-GFS 0,25° (GFS) e HYSPLIT-WRF 1 km (WRF) e os dados observados na Estação Automática de São Cristovão (EASC), no Aeroporto Galeão (SBGL) e no Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) referente aos cenários de liberação hipotética de antraz, no campus da FIOCRUZ, Bairro de Manguinhos, Rio de Janeiro, Brasil.

ÍNDICES	TEMPERATURA (°C)						DIREÇÃO DO VENTO (°)					
	EASC		SBGL		SBRJ		EASC		SBGL		SBRJ	
	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF
COR	0,58	0,74	0,95	0,98	0,99	0,82	0,52	0,06	0,53	0,13	-0,07	-0,14
EQMN	0,80	0,54	0,32	0,22	0,13	0,47	2,44	2,89	1,56	1,22	2,30	1,63
EAM	1,78	1,43	1,71	1,38	0,75	1,29	89,1	90,27	93,99	92,02	107,14	116,45
BIAS	-0,98	-0,49	0,69	1,33	-0,62	0,02	-89,1	-83,53	-93,99	-13,80	-107,14	-68,44
Fb	0,05	0,03	-0,04	-0,07	0,03	0,00	0,86	0,66	0,71	0,09	0,97	0,45
Fs	0,38	0,01	0,61	0,25	0,17	-0,18	0,69	0,77	0,09	0,50	0,89	0,82
ÍNDICES	VELOCIDADE DO VENTO (m/s)						PRESSÃO ATMOSFÉRICA (hPa)					
	EASC		SBGL		SBRJ		EASC		SBGL		SBRJ	
	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF	GFS	WRF
COR	0,39	0,00	0,73	0,71	-0,08	0,55	0,64	0,64	0,91	0,91	0,75	0,90
EQMN	0,90	1,09	1,86	1,02	1,32	1,13	2,64	3,49	20,62	2,62	15,84	1,42
EAM	3,82	3,25	0,92	0,68	1,70	1,38	2,22	2,52	6,78	2,28	6,17	1,67
BIAS	-0,53	-0,38	0,90	0,13	0,10	-0,98	-2,22	2,52	-6,78	-2,28	-6,17	-1,67
Fb	0,18	0,17	0,40	-0,07	-0,03	0,35	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Fs	1,35	1,12	-0,11	-0,35	0,68	0,29	0,24	0,14	0,20	0,11	0,13	0,07

Nota: Realce verde: GFS com melhor desempenho; Realce azul: WRF com melhor desempenho; Realce laranja: ambos modelos com o mesmo desempenho.

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar a variável temperatura, verifica-se que o HYSPLIT-WRF 1 km possui melhor desempenho para todos os índices avaliados frente os dados da EASC. O HYSPLIT-WRF 1 km também apresenta melhor desempenho na maioria dos índices em relação aos dados do SBGL. Quanto a comparação aos dados do SBRJ a situação é oposta, o HYSPLIT-GFS 0,25° exibe melhor desempenho na maioria dos índices elencados. No que concerne o índice BIAS, os modelos subestimam os valores observados da EASC, superestimam os dados do SBGL e se opõem em relação ao SBRJ. Quanto ao índice Fb, os desvios são pouco significativos entre os valores da modelagem e observacional.

Em relação a variável direção do vento, o HYSPLIT-GFS 0,25° apresenta melhor desempenho frente a maioria dos dados observados da EASC. Já os dados simulados pelo HYSPLIT-WRF 1 km exibem melhor desempenho para a maioria dos índices frente aos dados observados do SBGL e do SBRJ. Com relação aos índices BIAS e Fb, todas as simulações possuem dados subestimados.

A variável velocidade do vento mostra-se melhor representada pelas simulações executadas no modelo HYSPLIT-WRF 1 km. Com relação ao índice BIAS, os modelos subestimam seus valores em relação à EASC, superestimam seus dados do SBGL e se opõem acerca de seus dados do SBRJ. Já em relação ao índice Fb, os modelos subestimam seus dados a respeito da EASC e se opõem em referência a seus dados do SBGL e do SBRJ.

Por fim, a variável pressão atmosférica é melhor representada na EASC pelos dados simulados no HYSPLIT-GFS 0,25°. Os dados dos aeroportos possuem melhor representatividade pelo modelo HYSPLIT-WRF 1 km. Com exceção da comparação entre HYSPLIT-WRF 1 km e EASC, todas as observações dos índices BIAS indicam tendência para a subestimativa. O índice Fb apresenta todos os desvios com valores pouco significativos.

De uma maneira geral o modelo HYSPLIT-WRF 1 km foi o que apresentou melhor destreza nas simulações. Esse achado ratifica as análises realizadas por Hackerott (2013) e por Moraes, Marton e Pimentel (2014) em estudos anteriores na mesma região de estudo.

5.3 POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO MODELO HYSPLIT

A partir dos resultados obtidos durante a confecção das revisões integrativas de literatura, das análises dos diversos tipos de materiais técnico-científicos relacionados ao HYSPLIT e da execução das simulações, pode-se elencar algumas potencialidades e limitações da utilização do modelo frente ao contexto estudado. A seguir, esses fatores são discriminados:

Potencialidades

Com relação a produção das trajetórias, o modelo é capaz de simular trajetórias simultâneas únicas ou múltiplas com distintos *inputs* em relação ao espaço e ao tempo. Há a possibilidade de utilizar grades opcionais de locais de partida iniciais e executar cálculos com períodos no passado ou com dados de previsão. O movimento vertical possui diversas opções de entrada (ômega, isentrópico, isosigma, isobárico, isopícnico). Também é possível trabalhar com opções de conjunto de trajetória usando variações meteorológicas e viável obter as saídas de variáveis meteorológicas ao longo de uma trajetória (NOAA, 2022). Além disso, *clusters* podem ser gerados através da integração de diversas trajetórias, o que reconhecidamente minimiza as incertezas das trajetórias simples (OLSEN *et al.*, 2019; QIN *et al.*, 2019; SKJØTH *et al.*, 2015).

Quanto as simulações de dispersão de partículas, é exequível a simulação de emissões instantâneas ou contínuas a partir de fontes pontuais ou de uma determinada área, podendo trabalhar com grades de saída de concentração de resolução múltipla e com amostragem dinâmica ou fixa. Outros aspectos que podem ser explorados são a deposição úmida e seca, o decaimento radioativo e a ressuspensão, além da emissão de várias espécies de poluentes de forma simultânea. A computação da matriz da fonte-receptor é realizada de maneira automatizada e a dispersão é baseada em variações na meteorologia, turbulência ou física. Outrossim, *outputs* de probabilidade das concentrações são emitidos para várias simulações e o algoritmo de emissão de tempestade de poeira é integrado no modelo. A massa pode ser transferida para um módulo euleriano, a fim de computar simulações em escala global e é possível definir constantes de taxa para converter uma espécie em outra (NOAA, 2022).

No que concerne a meteorologia, o HYSPLIT pode ser executado com várias grades de dados de entrada aninhadas. Os dados meteorológicos são interpolados bilinearmente no espaço e interpolados linearmente no tempo para o local e tempo de liberação de um poluente e durante a previsão da difusão subsequente de materiais. Atualmente, utiliza *links* para acesso ao servidor de dados meteorológicos ARL e NWS, além de acessar os dados de previsões e arquivos, incluindo NCEP/NCAR *Reanalysis*. O modelo pode trabalhar conjuntamente com programas adicionais para converter MM5, RAMS, COAMPS, WRF e outros tipos de dados, além de programas utilitários para exibir e manipular dados meteorológicos (NOAA, 2022). Tornando-o como uma alternativa frente à indisponibilidade e/ou má qualidade dos dados meteorológicos oriundos de estações automáticas ou semiautomáticas, ou até mesmo das medições manuais.

O *script* executado na GUI possui ferramenta de ajuda compatível com *HTML*. Os gráficos do modelo podem ser exibidos como arquivos *postscript* e conversores para muitos outros formatos, tais como: GrADS; ArcView; Vis5D; KMZ. Diversos estudos analisados durante a confecção das revisões de literatura adotaram essa estratégia (APANGU *et al.*, 2020; BHAGANAGAR; BHIMIREDDY, 2020; HERNÁNDEZ-CEBALLOS *et al.*, 2020; MOHAMMED SAEED *et al.*, 2020; FEYZINEJAD *et al.*, 2019; SKRYNYK *et al.*, 2019; BILIŃSKA *et al.*, 2019; MOHAMMED SAEED *et al.*, 2019; OLSEN *et al.*, 2019; QIN *et al.*, 2019; SADYŚ, 2017; SADYŚ; KENNEDY; SKJØTH, 2015; SKJØTH *et al.*, 2015).

Conforme já sinalizado por Bhaganagar e Bhimireddy (2020) e Hernández-Ceballos *et al.* (2014) a utilização do WRF acoplado ao HYSPLIT melhora a qualidade dos dados meteorológicos em simulações de pequena escala.

Limitações

De acordo com os manuais do modelo, a interface HYSPLIT não incorpora os seguintes efeitos: reações químicas; gases densos; subprodutos de incêndios, explosões ou reações químicas; gases liberados que não são de flutuação neutra; deposição, a não ser que o usuário insira parâmetros apropriados de deposição úmida e seca; transporte de partículas, a menos que o usuário insira informações sobre a partícula (tamanho, taxas de deposição, etc); terreno complexo; taxa de emissão variável com o tempo (exceto para simulação de queima controlada); taxa de emissão variável com a altura (exceto para simulação de cinzas vulcânicas) (NOAA, s. d.).

O passo de tempo mínimo do HYSPLIT é de 1 minuto, portanto, o modelo não pode ser usado para transporte inferior à distância que leva para o poluente se deslocar em 1 minuto (NOAA, s. d.).

A orientação é não utilizar o HYSPLIT em modelagens inferiores a 1 km, pois as rotinas de plotagem HYSPLIT padrão não sejam otimizadas para distâncias muito curtas. Em situações acima de 1 km há a possibilidade de obter uma visualização aproximada da pluma alterando a configuração do display da concentração e adotando um zoom de 100% (NOAA, 2021).

Para lançamentos de materiais perigosos com base no solo, as condições meteorológicas próximas à superfície, incluindo ventos de 10 metros, temperaturas de 2 m e fluxos de superfície (que determinam a estabilidade e, portanto, a dispersão vertical do material) são determinantes importantes da propagação horizontal e vertical do material. Os dados de previsão meteorológica disponíveis para rodar o HYSPLIT podem possuir problemas de

representatividade para a dispersão da modelagem em, por exemplo, áreas de terreno complexo. Essa limitação pode ser corrigida entrando manualmente com dados meteorológicos locais no modelo ou utilizando os dados, por exemplo, do WRF com dimensões menores que 3 km (como adotada nessa tese), porém são recursos que necessitam de treinamento extremamente especializado e recursos computacionais mais avançados.

Os dados meteorológicos usados no HYSPLIT estão disponíveis em resolução temporal relativamente grosseira (1-6 h), o que pode resultar em erros em condições que mudam rapidamente. Os modelos NWP também possuem limitações em sua capacidade de prever com precisão o início e as escalas espaciais de fenômenos que podem afetar a dispersão, tais como brisas marítimas e circulações de vales de montanhas. Finalmente, se ocorrerem variações importantes nos campos meteorológicos entre os pontos da grade ou entre os tempos de saída dos dados meteorológicos, podem ocorrer erros de concentração.

A conversão dos dados meteorológicos oriundos do modelo WRF só pode ser realizada no HYSPLIT instalado em ambiente Linux, um sistema operacional que grande parte dos usuários não possui familiaridade, ou no MAC, marca de elevado valor monetário, principalmente no Brasil.

Além de elencar as potencialidades e limitações do modelo, considera-se relevante apontar alguns aspectos referentes à experiência do usuário. Estes aspectos seguem descritos abaixo:

Facilidades e Dificuldades

O modelo HYSPLIT além de ser um programa gratuito é atualizado, constantemente, de acordo com os avanços científicos e tecnológicos. A equipe do ARL/NOAA promove *workshops* gratuitos e disponibiliza em sua página da internet um fórum de discussão para os usuários do modelo.

A opção de entrada de dados meteorológicos oriundos de diversos bancos de dados possibilita a execução das modelagens com agilidade e pode abranger áreas desprovidas de estações meteorológicas ou cuja qualidade dos dados é comprometida.

A versão instalada possui uma gama de possibilidades de configuração das simulações, podendo gerar resultados mais detalhados e próximos da realidade estudada. Porém, é necessário um aprofundamento nos documentos técnicos e muitas vezes recorrer aos treinamentos e ao fórum de usuários organizados pelo NOAA.

Alguns erros podem ocorrer inesperadamente durante as corridas e mesmo com as

orientações contidas nos manuais, tais como limpeza do diretório *working* e verificação do arquivo *infile*, é necessário reiniciar o modelo.

Outra dificuldade encontrada foi a de usar mais de 12 arquivos de entrada meteorológica usando a GUI. O programa informa que essa ação não pode ser executada pela GUI e que há outra forma de entrar com mais arquivos alterando a programação dos comandos, o que depende de conhecimento de programação. Frente a este problema, tentou-se usar o pacote SplitR, mas ele apresentou o mesmo problema. Outro programa foi testado, o plugin TrajStat do MeteoInfo, mas o mesmo só permite análise mensal das trajetórias. Ambos os programas oferecem a opção de configurar as funções dos pacotes e isso também requer amplo conhecimento de programação e fugiria do foco da tese.

Outrossim, não houve êxito na simulação de trajetórias, do tipo *forward*, com períodos de duração acima das 6 h, provavelmente, esse fato pode estar relacionado com a capacidade do modelo lidar com extensos períodos de calmaria (observados principalmente entre os dias 1 e 2 de julho de 2021). Esse aspecto será analisado com maior aprofundamento em futuros projetos de pesquisa, relacionando esses achados com outros MDA que possuem maior capacidade computacional e técnica para equacionar essas características climatológicas.

Por fim, para processar as simulações na versão instalada não é necessária a conexão com a internet, mas dependendo do tamanho dos arquivos de dados meteorológicos utilizados é indispensável recursos que permitam alta capacidade de armazenamento. No caso de simulações com diversos *inputs* e com períodos longos de duração também é basilar um computador com processamento compatível a atividade.

5.4 CONTRIBUIÇÕES DO MODELO HYSPLIT NA GESTÃO DE EVENTOS ENVOLVENDO A LIBERAÇÃO ACIDENTAL DE *BACILLUS ANTHRACIS*

Para a elaboração da matriz de análise buscou-se elencar os subsídios resultantes das análises das revisões bibliográficas e das simulações executadas pelo modelo HYSPLIT e relacioná-las com as principais tarefas de cada etapa da gestão de um evento envolvendo a liberação acidental de antraz (**Quadro 9**).

Quadro 9: Matriz de análise da contribuição do modelo HYSPLIT em relação as principais tarefas de cada etapa da gestão de eventos acidentais envolvendo antraz.

MATRIZ DE ANÁLISE			
ETAPAS DA GESTÃO DE EVENTOS ACIDENTAIS COM ANTRAZ	TAREFAS	CONTRIBUIÇÃO DO HYSPLIT	
PREVENÇÃO	Planejamento - Avaliação do ambiente operacional	Identificar ameaças (tipo de agente e perigos para a saúde e o meio ambiente).	- Simula a dispersão atmosférica de acordo com as características aerodinâmicas do antraz. - Gera subsídios que podem auxiliar no provimento de materiais de proteção adequados e em quantitativo suficiente.
		Reconhecer o ambiente físico (infraestruturas críticas, locais de risco e ocupação do terreno).	- Gera arquivos de saída das simulações compatíveis com diversos programas de georreferenciamento, o que pode identificar se ou quando as trajetórias das massas aéreas ou plumas contendo o antraz sobrevoam determinadas áreas.
		Avaliar as capacidades e vulnerabilidades.	- As informações produzidas durante a identificação das ameaças e o reconhecimento do ambiente físico podem auxiliar na avaliação das capacidades e vulnerabilidades.
	Preparação - Implementação do plano aprovado e dos acordos estabelecidos	Treinamento, exercícios e certificação.	- Gera dados para auxiliar na configuração de distintos cenários hipotéticos. - Gera simulações configuradas em intervalos de tempo que podem ser definidos de acordo com a necessidade da operação. - Gera simulações que podem ser configuradas de acordo com as características climatológicas e com as características aerodinâmicas do antraz. - A versão instalada pode ser utilizada sem sinal de <i>internet</i> . - A plataforma READY necessita de sinal de <i>internet</i> , mas todo o processamento das simulações é executado pelos servidores do NOAA (possibilidade de executar uma simulação pelo celular).
		Reavaliar as capacidades e vulnerabilidades	- As informações produzidas durante os treinamentos, exercícios e as certificações podem demonstrar possíveis potencialidades e fragilidades dos planos, dos materiais e das equipes envolvidas nas etapas de execução.

Fonte: Elaboração própria.

Continuação – Quadro 9: Matriz de análise da contribuição do modelo HYSPLIT em relação as principais tarefas de cada etapa da gestão de eventos biológicos acidentais envolvendo antraz.

MATRIZ DE ANÁLISE			
ETAPAS DA GESTÃO DE EVENTOS ACIDENTAIS COM ANTRAZ	TAREFAS	CONTRIBUIÇÃO DO HYSPLIT	
EXECUÇÃO	Resposta - Ações para salvar vidas, proteger propriedades e estabelecer controle	Avaliar o local do evento.	<ul style="list-style-type: none"> - Emprega dados meteorológicos oriundos de banco de dados disponíveis na <i>internet</i>. - Utiliza dados meteorológicos de previsão do tempo disponíveis na <i>internet</i>. - Permite a entrada de dados meteorológicos coletados pelo usuário. - Gera simulações configuradas em intervalos de tempo que podem ser definidos de acordo com a necessidade da operação. - Gera simulações que podem ser configuradas de acordo com as características aerodinâmicas do agente biológico. - A versão instalada pode ser utilizada sem sinal de <i>internet</i>. - A plataforma READY necessita de sinal de <i>internet</i>, mas todo o processamento das simulações é executado pelos servidores do NOAA, o que possibilita a execução da simulação pelo celular.
		Estabelecer medidas de controle (equipamentos de proteção, acesso limitado, controle de contaminação, segurança do local, descontaminação, zonas de proteção do perigo e rotas de acesso).	<ul style="list-style-type: none"> - Auxilia no delineamento da área de pegada e de perigo do evento (predição). É possível verificar os deslocamentos das massas aéreas e das plumas contaminadas com distintas concentrações do antraz, em relação ao tempo e o espaço. - Gera subsídios que podem auxiliar na adoção dos materiais de proteção corretos e no tempo adequado. - Auxilia na escolha da localização da área de controle de contaminação, além de identificar o possível período que a contaminação pode ser mais efetiva. - Auxilia na escolha da localização da área de descontaminação dos indivíduos possivelmente contaminados e das equipes de respostas, além de identificar possíveis áreas que necessitem de ações de descontaminação ambiental.
	Executar ações de vigilância ambiental e epidemiológica.	- Gera subsídios para as coletas ambientais e para o delineamento das áreas e das estratégias de vigilância epidemiológica.	
	Recuperação - Restauração da normalidade	Restaurar as capacidades da missão.	- Identifica as possíveis áreas com maior ou menor concentração de antraz ou o período em que o risco de contaminação é baixo ou inexistente.
		Restaurar os serviços essenciais interrompidos.	
		Executar revisão pós-ação e levantamento das lições aprendidas.	- Gera informações acerca das condições climáticas e da dispersão atmosférica do antraz em relação ao tempo e espaço.

Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise da matriz foi possível identificar que o modelo HYSPLIT contribui com todas as principais tarefas relacionadas a gestão de eventos biológicos acidentais (**Quadro 9**).

Reafirma-se a capacidade do HYSPLIT em estimar antecipadamente as áreas mais vulneráveis à contaminação, em ser executado de forma rápida, acessível e gerar distintos subsídios para as equipes envolvidas na resposta e recuperação de um evento acidental. Essas contribuições coadunam com as ponderações realizadas por Hernández-Ceballos *et al.* (2020), Mohammed Saeed *et al.* (2019) e Ponseel, Fillon e Schuliar (2011) ao analisarem o modelo em outros contextos de eventos QBRN.

Outra reconhecida competência do modelo é, em casos de identificação de uma possível contaminação, identificar as possíveis origens do material liberado, adotando como sentido das trajetórias o tipo *backward*. Esse recurso não foi avaliado nesta tese, pois não estava no escopo do cenário simulado, mas é uma configuração extremamente útil tanto na prevenção, quanto na execução do gerenciamento dos eventos QBRN (PEREIRA *et al.*, 2019).

Ressalta-se que a matriz de análise apresentada no **Quadro 9** foi elaborada no contexto do cenário simulado nesta tese, porém ela pode ser customizada de acordo com as peculiaridades de outros tipos de agentes biológicos ou até mesmo de outros eventos QBRN.

Os eventos QBRN são permeados de incertezas e extremamente dinâmicos. Todas as decisões devem ser tomadas de forma célere para salvar vidas, prevenir lesões, fornecer suporte de vida crítico temporário, proteger propriedades críticas, infraestrutura e meio ambiente; restabelecer as operações essenciais; conter o evento; e preservar a segurança nacional (DEPARTMENT OF THE ARMY - USA, 2015).

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O modelo HYSPLIT revelou-se como um recurso tecnológico mundialmente utilizado, principalmente, em pesquisas vinculadas às ciências atmosféricas. Ele apresentou alta aplicabilidade e a multifuncionalidade no contexto de eventos QBRN e em pesquisas que analisam a dispersão de diversos agentes biológicos em áreas urbanas.

Mesmo sendo um *software* gratuito, o HYSPLIT permite a customização de diversas variáveis físico-químicas relacionadas aos eventos de dispersão atmosférica e é continuamente atualizado, de acordo com o avanço científico e tecnológico das áreas da Ciência correlatas ao tema. Ademais, a equipe do ARL/NOAA promove treinamentos constantes e fóruns de discussão para os usuários.

Na versão instalada é possível configurar diversos tipos e condições de evento, porém esse potencial requer um conhecimento mais aprofundado da utilização do *software* e maior capacidade computacional do *hardware*.

A entrada de dados oriundos do sistema GFS 0,25° pode ser executada na própria GUI do modelo HYSPLIT de uma forma célere e fácil, já os dados do modelo WRF 1 km requerem um pré-processamento, o que demanda mais tempo, conhecimento especializado e capacidade computacional.

No contexto do episódio hipotético de liberação acidental de antraz no Pavilhão HPP/FIOCRUZ/Manguinhos, as simulações das trajetórias das massas aéreas e das concentrações conseguiram em sua grande maioria assimilar as dinâmicas dos ventos do local estudado, principalmente, as relacionadas aos efeitos das brisas marítimas de terrestres.

A maior parte das trajetórias de massas aéreas ultrapassou o raio de 50 km de extensão, perfil que excede todas as estimativas de áreas de predição do tipo detalhada para esse tipo de evento que são adotadas no Manual de Defesa QBRN da Marinha do Brasil.

As trajetórias simuladas pelo HYSPLIT-GFS 0,25° desconsideraram algumas características topográficas da RMRJ, como por exemplo a existência da Serra do Mendanha e o Parque Nacional da Pedra Branca. Já as trajetórias executadas pelo modelo HYSPLIT-WRF 1 km não cruzaram graficamente as barreiras topográficas e sim as sobrevoaram, confirmando um dos benefícios de adotar modelos com menor resolução espacial.

Em relação a modelagem de dispersão atmosférica, as simulações tanto do HYSPLIT-GFS 0,25° quanto do HYSPLIT-WRF 1 km revelam que os períodos da madrugada/manhã e manhã/tarde analisados possuem diversos momentos de calmaria, essa característica dificultaria a dispersão da pluma contaminada e manteria maior carga bacteriana nas áreas extremamente

próximas do ponto de liberação (~ 1 km), nas primeiras horas do evento.

A utilização dos dados meteorológicos oriundos do modelo WRF 1 km permitiu melhorar a qualidade das simulações. Além da melhor incorporação das informações do relevo durante a modelagem no HYSPLIT, ele apresentou melhor destreza frente a análise estatística realizada em relação aos dados observados na EASC, no SBGL e no SBRJ. Porém sinaliza-se a necessidade de ampliar o período de análise, a fim de permitir maior robustez nos achados estatísticos, e para demais épocas do ano para avaliar os efeitos da dinâmica meteorológica nas simulações.

De acordo com a análise realizada nesta tese, as modelagens HYSPLIT-GFS 0,25° poderiam ser adotadas nas primeiras previsões de um evento de liberação acidental de um agente biológico e assim que fosse possível, as previsões poderiam ser atualizadas a partir dos subsídios gerados pelas modelagens HYSPLIT-WRF 1 km.

O modelo HYSPLIT é capaz de contribuir potencialmente com informações e recursos abrangentes e orientados aos tomadores de decisão nas distintas etapas do gerenciamento de eventos biológicos acidentais. Além disso, considera-se que as modelagens com o HYSPLIT também podem ser empregadas no contexto de liberação intencional de agentes biológicos. Elas poderiam ser executadas para a preparação de diversos eventos de massa que ocorrem no Brasil, tais como: réveillon da praia de Copacabana; os desfiles das escolas de samba no Sambódromo; os grandes eventos musicais e esportivos nos estádios e arenas.

Elencam-se como perspectivas futuras: (a) comparar as modelagens executadas com outros MDA para verificar os possíveis efeitos de longos períodos de calmaria (b) georreferenciar as saídas das modelagens e associá-las aos novos dados do Censo Populacional do IBGE; e (c) correlacionar as informações anteriores em *softwares* de modelagem epidemiológica para avaliar qual seria os possíveis impactos na saúde.

Esta tese e seus desdobramentos serão apresentados em Fóruns e Grupos de Trabalho relacionados à Defesa QBRN na Marinha do Brasil e em eventos relacionados à Política Nacional de Biossegurança e Bioproteção. Espera-se promover o uso do modelo HYSPLIT como recurso científico-tecnológico a ser incorporado na práxis das análises de riscos biológicos em ambientes laboratoriais e na gestão de eventos QBRN.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, T.; BAIG, M.; OTHMAN, S. S.; MALIBARY, H.; AHMAD, S.; RASHEED, S. M.; AL BATAINEH, M. T.; AL-OMARI, B. Bibliometric Analysis and Visualization Mapping of Anthrax Vaccine Publications from 1991 through 2021. **Vaccines**, v. 10, n. 7, p. 1007, 23 jun. 2022.
- ALAM, M. E.; KAMAL, M. M.; RAHMAN, M.; KABIR, A.; ISLAM, M. S.; HASSAN, J. Review of Anthrax: A Disease of Farm Animals. **Journal of Advanced Veterinary and Animal Research**, v. 9, n. 2, p. 323–334, jun. 2022.
- ALMEIDA, M. E. de. A permanente relação entre biologia, poder e guerra: o uso dual do desenvolvimento biotecnológico. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 20, p. 2255–2266, jul. 2015.
- ALMEIDA, V. A. de; FRANÇA, G. B.; VELHO, H. F. C.; EBECKEN, N. F. F. Artificial Neural Network for Data Assimilation by WRF Model in Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 38, n. 2, 28 abr. 2020. Disponível em: <https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/2042>. Acesso em: 12 nov. 2022.
- ALVES, K. B. P. **Utilização de componentes principais para análise de experimentos com respostas múltiplas**: uma aplicação em modelos para previsão meteorológica. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- AN, H. Y.; KANG, Y.-H.; SONG, S.-K.; KIM, Y.-K. Atmospheric Dispersion Characteristics of Radioactive Materials according to the Local Weather and Emission Conditions. **Journal of Radiation Protection and Research**, 2016.
- ANVISA. Resolução 222 de 2018. Dispõe sobre o regulamento técnico para gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. 2018. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/3427425/RDC_222_2018_.pdf/c5d3081d-b331-4626-8448-c9aa426ec410. Acesso em: 12 ago. 2022.
- APANGU, G. P.; FRISK, C. A.; ADAMS-GROOM, B.; SATCHWELL, J.; PASHLEY, C. H.; SKJØTH, C. A. Air mass trajectories and land cover map reveal cereals and oilseed rape as major local sources of *Alternaria* spores in the Midlands, UK. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 9, p. 1668–1679, 1 set. 2020.
- ARDIÓNS, J. P.; NAVARRO, M. B. M. de A.; CARDOSO, T. A. de O. Biossegurança e sistemas de informação: a rede e o gerenciamento de risco. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 21, n. 3, p. 303–308, set. 2013.
- ARMOND, N. B. Entre eventos e episódios: as excepcionalidades das chuvas e os alagamentos no espaço urbano do Rio de Janeiro. 2014. Presidente Prudente, 2014.
- ARMSTRONG, M. **Germ Wars**: The politics of microbes and America's landscape of fear. Oakland: California: University of California Press, 2017.
- AUXIER, J. P.; AUXIER, J. D.; HALL, H. L. Review of Current Nuclear Fallout Codes. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 171, p. 246–252, maio 2017.
- BASSO, A.; SERRA, R.; DRAGO, I.; SOLEO, L.; LOVREGLIO, P. Biological Accidents at

Work among Resident Physicians in Specialist Training at Bari University Hospital, Italy. **American Journal of Infection Control**, v. 44, n. 11, p. e265–e267, 1 nov. 2016.

BCB - BIPARTISAN COMMISSION ON BIODEFENSE. **Saving Sisyphus: Advanced Biodetection for the 21st Century** Washington, DC: Bipartisan Commission on Biodefense, 2021. Disponível em: <https://biodefensecommission.org/reports/saving-sisyphus-advanced-biodetection-for-the-21st-century/>. Acesso em: 4 abr. 2022.

BERBERT, L. C.; FLORES, V. R.; DIREITO, I. C. N.; CARDOSO, A. M. Abordagem dos temas Bioproteção e Bioterrorismo na Educação: Proposta de Curso de Extensão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. 6, 2022.

BERIO FORTINI, L.; KAISER, L. R.; XUE, L.; WANG, Y. Bioclimatic variables dataset for baseline and future climate scenarios for climate change studies in Hawai'i. **Data in Brief**, v. 45, p. 108572, 2 set. 2022.

BHAGANAGAR, K.; BHIMIREDDY, S. Local Atmospheric Factors That Enhance Air-Borne Dispersion of Coronavirus - High-Fidelity Numerical Simulation of COVID19 Case Study in Real-Time. **Environmental Research**, v. 191, p. 110170, dez. 2020.

BILIŃSKA, D.; KRYZA, M.; WERNER, M.; MALKIEWICZ, M. The Variability of Pollen Concentrations at Two Stations in the City of Wrocław in Poland. **Aerobiologia**, v. 35, n. 3, p. 421–439, 1 set. 2019.

BLOOM, J. D.; CHAN, Y. A.; BARIC, R. S.; BJORKMAN, P. J.; COBEY, S.; DEVERMAN, B. E.; FISMAN, D. N.; GUPTA, R.; IWASAKI, A.; LIPSITCH, M.; MEDZHITOV, R.; NEHER, R. A.; NIELSEN, R.; PATTERSON, N.; STEARNS, T.; VAN NIMWEGEN, E.; WOROBEY, M.; RELMAN, D. A. Investigate the Origins of COVID-19. **Science** (New York, N.Y.), v. 372, n. 6543, p. 694, 14 maio 2021.

BOWER, W. A.; HENDRICKS, K. A.; VIEIRA, A. R.; TRAXLER, R. M.; WEINER, Z.; LYNFIELD, R.; HOFFMASTER, A. What Is Anthrax? **Pathogens**, v. 11, n. 6, p. 690, 16 jun. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.538, DE 1º de agosto de 2011**. Brasil. Casa Civil, 2011.

BRASIL. **Portaria Normativa nº 585, de 7 de março de 2013**. Brasil. 2013.

BRASIL. **Portaria HFAG nº 147-T/ACI, 2015**. Brasil. 2015.

BRASIL. **Lei nº 13.260, de 16 de março de 2016**. Brasil. 2016.

BRASIL. **Portaria nº 53, de 25 de junho de 2018**. Brasil. 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Biossegurança em saúde: prioridades e estratégias de ação**. Ministério da Saúde, Organização Pan-Americana da Saúde, 2010. Disponível em: https://bvsm.sau.gov.br/bvs/publicacoes/biosseguranca_sau_prioridades_estrategicas_acao.pdf. Acesso em: 22 jun. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Ações

Programáticas Estratégicas. **Exposição a materiais biológicos**. Editora do Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Construindo a política nacional de biossegurança e bioproteção**: ações estratégicas da saúde. Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia, Inovação e Insumos Estratégicos em Saúde, Departamento de Gestão e Incorporação de Tecnologias e Inovação em Saúde, 2019. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/construindo_politica_nacional_biosseguranca_bio_protecao.pdf. Acesso em: 4 jun. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância das Doenças Transmissíveis. **Biocontenção**: o gerenciamento do risco em ambientes de alta contenção biológica NB3 e NBA3 [recurso eletrônico] Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2015. Disponível em: http://biblioteca.cofen.gov.br/wp-content/uploads/2015/05/biocontencao_gerenciamento_risco_ambientes_alta_contencao.pdf. Acesso em: 14 ago. 2022.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 1.809** - Institui o Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro, e dá outras providências. 7 out. 1980. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/De11809.htm. Acesso em: 17 out. 2022.

BRASIL. **Decreto Nº 9** - Promulga a Convenção sobre Pronto Notificação de Acidente Nuclear. 15 jan. 1991a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d0009.htm. Acesso em: 16 out. 2022.

BRASIL. **Decreto Nº 8** - Promulga a Convenção sobre Assistência no Caso de Acidente Nuclear ou Emergência Radiológica. 15 jan. 1991b.

BRASIL. **Lei nº 8.974** - Regulamenta os incisos II e V do § 1º do art. 225 da Constituição Federal, estabelece normas para o uso das técnicas de engenharia genética e liberação no meio ambiente de organismos geneticamente modificados, autoriza o Poder Executivo a criar, no âmbito da Presidência da República, a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança, e dá outras providências. 5 jan. 1995. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/18974.htm. Acesso em: 15 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 2210** - Regulamenta o Decreto-Lei nº 1.809, de 7 de outubro de 1980, que instituiu o Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (SEPRON), e dá outras providências. 22 abr. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1997/d2210.htm. Acesso em: 17 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.105/2005**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/11105.htm. Acesso em: 15 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 5705** - Promulga o Protocolo de Cartagena sobre Biossegurança da Convenção sobre Diversidade Biológica. 16 fev. 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5705.htm. Acesso em: 15 out. 2022.

BRASIL. Secretaria de Ciência, Tecnologia, Inovação e Insumos Estratégicos em Saúde.

Classificação de risco dos agentes biológicos. Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia, Inovação e Insumos Estratégicos em Saúde, Departamento de Gestão e Incorporação de Tecnologias e Inovação em Saúde, 2022. Disponível em: https://bvsm.s.saude.gov.br/bvs/publicacoes/classificacao_risco_agentes_biologicos_1ed.pdf. Acesso em: 26 ago. 2022.

BULFONE, T. C.; MALEKINEJAD, M.; RUTHERFORD, G. W.; RAZANI, N. Outdoor Transmission of SARS-CoV-2 and Other Respiratory Viruses: A Systematic Review. **The Journal of Infectious Diseases**, v. 223, n. 4, p. 550–561, 24 fev. 2021.

CALDER, A.; BLAND, S. CBRN considerations in a major incident. **Surgery for Major Incidents**, v. 36, n. 8, p. 417–423, 2018.

CARDOSO, T. A. de O. **Espaço/Tempo, Informação e Risco no Campo da Biossegurança.** 2001. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

CARDOSO, T. A. de O. **Análise da Construção da Competência do Brasil em Direção ao Laboratório de Contenção Máxima:** realidades e perspectivas. 2008. Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/handle/icict/4381/ve_Telma_Cardoso_ENSP_2008.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em: 1 maio. 2018.

CARLSON, C. J.; GETZ, W. M.; KAUSRUD, K. L.; CIZAUSKAS, C. A.; BLACKBURN, J. K.; BUSTOS CARRILLO, F. A.; COLWELL, R.; EASTERDAY, W. R.; GANZ, H. H.; KAMATH, P. L.; ØKSTAD, O. A.; TURNER, W. C.; KOLSTØ, A.-B.; STENSETH, N. C. Spores and Soil from Six Sides: Interdisciplinarity and the Environmental Biology of Anthrax (*Bacillus Anthracis*). **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 93, n. 4, p. 1813–1831, nov. 2018.

CARLSON, C. J.; KRACALIK, I. T.; ROSS, N.; ALEXANDER, K. A.; HUGH-JONES, M. E.; FEGAN, M.; ELKIN, B. T.; EPP, T.; SHURY, T. K.; ZHANG, W.; BAGIROVA, M.; GETZ, W. M.; BLACKBURN, J. K. The Global Distribution of *Bacillus Anthracis* and Associated Anthrax Risk to Humans, Livestock and Wildlife. **Nature Microbiology**, v. 4, n. 8, p. 1337–1343, ago. 2019.

CARVALHO, D. de A. **Contaminação do solo de Mangueiras, Rio de Janeiro (RJ), por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos:** uma análise socioambiental preliminar e um breve histórico da ocupação do território. 2020. Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca/FIOCRUZ, 2020.

CARVALHO, G. F. de. **Análise da sensibilidade do modelo WRF a diferentes configurações de regionalização dinâmica para modelagem da velocidade do vento.** 2015. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/38179/R%20-%20D%20-%20GLEICIANE%20FERNANDA%20DE%20CARVALHO.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 15 maio. 2021.

CAVALLINI, S.; BISOGNI, F.; MASTROIANNI, M. Economic Impact Profiling of CBRN Events: Focusing on Biological Incidents. **Archivum Immunologiae Et Therapiae Experimentalis**, v. 62, n. 6, p. 437–444, dez. 2014.

CDC. **Symptoms of Anthrax** | CDC. Disponível em: <https://www.cdc.gov/anthrax/symptoms/index.html>. Acesso em: 17 out. 2022.

CGEE. **Seminário Internacional Laboratório Nacional de Máxima Contenção Biológica (LNMCB)**. Relatório final. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/8645122/cgee_mcti_rel_fin_sem_LNMCB.pdf. Acesso em: 6 ago. 2022.

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. **Atmospheric Environment**, 2015.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. São Paulo: Edição do Autor, 2010.

COELHO, D. N. **Emergências em Saúde Pública por eventos químicos, biológicos, radiológicos e nucleares (QBRN) na perspectiva da inteligência estratégica: recomendações em prol da intersetorialidade na segurança da saúde e na biodefesa**. 2017. Escola Fiocruz de Governo, Brasília, DF, 2017. Disponível em: https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/handle/icict/49279/danilo_coelho_fiodf_mest_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em: 25 jun. 2022.

COLEMAN, C. N.; BADER, J. L.; KOERNER, J. F.; HRDINA, C.; CLIFFER, K. D.; HICK, J. L.; JAMES, J. J.; MANSOURA, M. K.; LIVINSKI, A. A.; NYSTROM, S. V.; DICARLO-COHEN, A.; MARINISSEN, M. J.; WATHEN, L.; APPLER, J. M.; BUDDEMEIER, B.; CASAGRANDE, R.; ESTES, D.; BYRNE, P.; KENNEDY, E. M.; JAKUBOWSKI, A. A.; CASE, C.; WEINSTOCK, D. M.; DAINIAK, N.; HANFLING, D.; GARRETT, A. L.; GRANT, N. N.; DODGEN, D.; REDLENER, I.; MACKAY, T. F.; TREBER, M.; HOMER, M. J.; TAYLOR, T. P.; MILLER, A.; KORCH, G.; HATCHETT, R. Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE) Science and the CBRNE Science Medical Operations Science Support Expert (CMOSSE). **Disaster Medicine and Public Health Preparedness**, v. 13, n. 5–6, p. 995–1010, dez. 2019.

COMANDO DE OPERAÇÕES TERRESTRES. **Manual de Campanha - Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear**. Brasil. Exército Brasileiro - Ministério da Defesa, 2016.

COMANDO-GERAL DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS. **Manual de Defesa Nuclear, Química, Biológica e Radiológica**. Brasil. Marinha do Brasil - Ministério da Defesa, 2018.

COMERIO, R. M.; TARAPOW, M.; VÁZQUEZ, S. C.; PATRICIO, W.; CORMACK, M. Bacterias adaptadas al frio. **Ciencia hoy**, v. 17, n. 99, p. 10–21, 2007.

CORRÊA, E. B.; CATALDI, M.; PIMENTEL, L. C. G. Análise comparativa das simulações do modelo de mesoescala MM5 e dados meteorológicos observados para a região do Galeão/RJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 29, n. 2, p. 66–86, 1 jan. 2006.

COSTA, E. S.; COSTA, A. A. Study of the transport of atmospheric pollutants in the pecém industrial and port complex (Cipp), ceará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36,

n. 3, p. 615–624, 2021.

CROSSETTI, M. da G. O. Revisão integrativa de pesquisa na enfermagem o rigor científico que lhe é exigido. **Revista Gaúcha de Enfermagem**, v. 33, n. 2, p. 8–9, 2012.

DE ALMEIDA, L. M. Comunicação do risco e gestão da ameaça pandêmica. **Territorium**, n. 14, p. 89–97, 26 ago. 2007.

DE NEGRI, F.; GALDINO, E. **A importância da infraestrutura para a produção em C&T: o caso CNPEM/Sirius**. 17 jan. 2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/297-a-importancia-da-infraestrutura-para-a-producao-em-c-t-o-caso-cnpe-sirius>. Acesso em: 15 set. 2022.

DE SOUZA, J. O.; DE ALMEIDA, M. M. C. Work accidents with exposure to biological material in physiotherapists according to formal and informal employment bonds. **Revista Pesquisa em Fisioterapia**, v. 10, n. 4, p. 683–691, 2020.

DEKA, J. P.; BARUAH, B.; SINGH, S.; CHAUDHURY, R.; PRAKASH, A.; BHATTACHARYYA, P.; TAMIL SELVAN, M.; KUMAR, M. Tracing Phosphorous Distributions in the Surficial Sediments of Two Eastern Himalayan High Altitude Lakes through Sequential Extraction, Multivariate and HYSPLIT Back Trajectory Analyses. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 11, p. 7617–7629, 1 jun. 2015.

DELORT, A.-M.; AMATO, P. **Microbiology of Aerosols**. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2018. 320 p.

DEPARTMENT OF THE ARMY (ed.). **Multi-Service Tactics, Techniques, and Procedures for Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Consequence Management Operations**. United States. Department of the Army, 30 jul. 2015. Disponível em: <https://www.hsdl.org/?abstract&did=786536>. Acesso em: 21 set. 2022.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Geociências – Departamento de Meteorologia , Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro , Recebido Jane. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 24–38, 2009.

DIEULIIS, D.; RAO, V.; BILLINGS, E. A.; MEYER, C. B.; BERGER, K. Biodefense Policy Analysis—A Systems-based Approach. **Health Security**, v. 17, n. 2, p. 1–17, 1 abr. 2019.

DRAXLER, R. HYSPLIT USER ' s GUIDE. n. April, 2020.

DRAXLER, Roland. R.; HESS, G. D. **Technical Memorandum ERL ARL-224: description of the HYSPLIT _4 modeling system**. Air Resources Laboratory, 2020. Disponível em: <https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/arl-224.pdf>. Acesso em: 10 maio. 2021.

DUARTE-DAVIDSON, R.; ORFORD, R.; WYKE, S.; GRIFFITHS, M.; AMLÔT, R.; CHILCOTT, R. Recent Advances to Address European Union Health Security from Cross Border Chemical Health Threats. **Environment International**, v. 72, p. 3–14, nov. 2014.

DUVAL, D.; PALMER, J. C.; TUDGE, I.; PEARCE-SMITH, N.; O'CONNELL, E.; BENNETT, A.; CLARK, R. Long distance airborne transmission of SARS-CoV-2: rapid systematic review. **BMJ**, v. 377, p. e068743, 29 jun. 2022.

EB. EXÉRCITO BRASILEIRO. COMANDO DE OPERAÇÕES TERRESTRES. **Manual de Campanha - Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear**. Ministério da Defesa: Exército Brasileiro, 2016.

FANG, S.; ZHUANG, S.; GOTO, D.; HU, X.; SHENG, L.; HUANG, S. Coupled modeling of in- and below-cloud wet deposition for atmospheric ¹³⁷Cs transport following the Fukushima Daiichi accident using WRF-Chem: A self-consistent evaluation of 25 scheme combinations. **Environment International**, v. 158, p. 106882, 1 jan. 2022.

FELSBERG, A.; ROSS, J. O.; SCHLOSSER, C.; KIRCHNER, G. Simulating the mesoscale transport of krypton-85. **Journal of Environmental Radioactivity**, 2018.

FEYZINEJAD, M.; MALAKOOTI, H.; SADRINASAB, M.; GHADER, S. Radiological dose Assessment by Means of a Coupled WRF-HYSPLIT Model under Normal Operation of Bushehr Nuclear Power Plant. **Pollution**, v. 5, n. 2, p. 429–448, 21 jan. 2019.

FIOCRUZ. **Quadro de paciente com suspeita de ebola é estável**. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/noticia/quadro-de-paciente-com-suspeita-de-ebola-e-estavel>. Acesso em: 3 dez. 2018.

FONTELLES, M. J.; SIMÕES, M. G.; FARIAS, S. H.; FONTELLES, R. G. S. **Metodologia da pesquisa científica**: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. 2009.

FORTES, M. de A. A política pública para respostas às ameaças químicas, biológicas, radiológicas, nucleares e nucleares explosivas. **Fundação Getúlio Vargas**, p. 199, 2012.

FRÖHLICH-NOWOISKY, J.; KAMPF, C. J.; WEBER, B.; HUFFMAN, J. A.; PÖHLKER, C.; MEINRAT O. ANDREAE; NAAMA LANG YONA; SUSANNAH M. BURROWS; SACHIN S. GUNTHER; WOLFGANG ELBERT; HANG SU; PETER HOOR; ECKHARD THINES; THORSTEN HOFFMANN; VIVIANE R. DESPRÉS; ULRICH PÖSCHL. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. **Atmospheric Research**, v. 182, p. 346–376, 2016.

GALÁN, C.; ARIATTI, A.; BONINI, M.; CLOT, B.; CROUZY, B.; DAHL, A.; FERNANDEZ-GONZÁLEZ, D.; FRENGUELLI, G.; GEHRIG, R.; ISARD, S.; LEVETIN, E.; LI, D. W.; MANDRIOLI, P.; ROGERS, C. A.; THIBAUDON, M.; SAULIENE, I.; SKJOTH, C.; SMITH, M.; SOFIEV, M. Recommended terminology for aerobiological studies. **Aerobiologia**, v. 33, n. 3, p. 293–295, 2017.

GALVEIAS, A.; COSTA, A. R.; BORTOLI, D.; ALPIZAR-JARA, R.; SALGADO, R.; COSTA, M. J.; ANTUNES, C. M. Cupressaceae Pollen in the City of Évora, South of Portugal: Disruption of the Pollen during Air Transport Facilitates Allergen Exposure. **Forests**, v. 12, n. 1, p. 64, jan. 2021.

GIANNAROS, C.; AGATHANGELIDIS, I.; PAPAVALASILEIOU, G.; GALANAKI, E.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, K.; GIANNAROS, T. M.; CARTALIS, C.;

MATZARAKIS, A. The extreme heat wave of July–August 2021 in the Athens urban area (Greece): Atmospheric and human-biometeorological analysis exploiting ultra-high resolution numerical modeling and the local climate zone framework. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159300, 20 jan. 2023.

GOMES, R. R. **Controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do estado de São Paulo**. Rio Claro. Universidade Estadual Paulista Julio Msquita Filho, 2022.

GÓMEZ-TATAY, L.; HERNÁNDEZ-ANDREU, J. M. Biosafety and biosecurity in Synthetic Biology: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 17, p. 1587–1621, 2 set. 2019.

GOPALASWAMI, N.; HAN, Z. Analysis of laboratory incident database. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 64, p. 104027, 1 mar. 2020.

HACKEROTT, J. A. **Simulação numérica a partir do modelo WRF e análise de ventos em superfície na região da Baía de Guanabara (RJ)**. 2013. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

HADDRELL, A. E.; THOMAS, R. J. Aerobiology: Experimental Considerations, Observations, and Future Tools. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 83, n. 17, p. e00809-17, 1 set. 2017.

HAMMES, G. R. **Atualização do sistema de previsão atmosférica regional por conjunto através do modelo WRF na EPAGRI/CIRAM**. 2022. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

HE, G. Crisis Management of International Biosecurity: Issues, Status Quo, and Debates. *Em: Preventive Diplomacy, Peacebuilding and Security in the Asia-Pacific*. Series on Asian Regional Cooperation Studies. [s.l.] WORLD SCIENTIFIC, 2021. p. 341–359.

HENDRICKS, K. A.; WRIGHT, M. E.; SHADOMY, S. V.; BRADLEY, J. S.; MORROW, M. G.; PAVIA, A. T.; RUBINSTEIN, E.; HOLTY, J.-E. C.; MESSONNIER, N. E.; SMITH, T. L.; PESIK, N.; TREADWELL, T. A.; BOWER, W. A. Centers for Disease Control and Prevention Expert Panel Meetings on Prevention and Treatment of Anthrax in Adults. **Emerging Infectious Diseases**, v. 20, n. 2, p. e130687, fev. 2014.

HERNÁNDEZ-CEBALLOS, M. A.; SANGIORGI, M.; GARCÍA-PUERTA, B.; MONTERO, M.; TRUEBA, C. Dispersion and Ground Deposition of Radioactive Material According to Airflow Patterns for Enhancing the Preparedness to N/R Emergencies. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 216, p. 106178, 1 maio 2020.

HERNÁNDEZ-CEBALLOS, M. Á.; SKJØTH, C.; GARCIA-MOZO, H.; BOLÍVAR, J.; GALÁN, C. Improvement in the accuracy of backtrajectories using WRF to identify pollen sources in southern Iberian Peninsula. **International Journal of Biometeorology**, 12 fev. 2014.

HULTQUIST, C.; CERVONE, G. Comparison of simulated radioactive atmospheric releases to citizen science observations for the Fukushima nuclear accident. **Atmospheric**

Environment, v. 198, p. 478–488, 1 fev. 2019.

IAEA. **The Radiological Accident in Goiânia**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988.

IMPERIALE, M. J.; HOWARD, D.; CASADEVALL, A. The Silver Lining in Gain-of-Function Experiments with Pathogens of Pandemic Potential. **Methods in Molecular Biology** (Clifton, N.J.), v. 1836, p. 575–587, 2018.

JAMOLIN, K.; SALTZMAN, J.; SCHAEFER, D.; SERRANO, S.; SHIM, A.; SLOANE, J. **Improving the Timeliness and Response to an Aerosolized anthrax Attack in the Metropolitan Washington, D.C. Region**. 2013. 2013. Disponível em: <https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/13877>. Acesso em: 22 set. 2022.

JANSEN, H. J.; BREEVELD, F. J.; STIJNIS, C.; GROBUSCH, M. P. Biological Warfare, Bioterrorism, and Biocrime. **Clinical Microbiology and Infection: The Official Publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases**, v. 20, n. 6, p. 488–496, jun. 2014.

JINDAL, A. K.; ROY, K. Bio-threat preparedness: Need for a paradigm shift. **Medical Journal, Armed Forces India**, v. 70, n. 2, p. 170–174, abr. 2014.

JIRANANTASAK, T.; BENN, J. S.; METRAILER, M. C.; SAWYER, S. J.; BURNS, M. Q.; BLUHM, A. P.; BLACKBURN, J. K.; NORRIS, M. H. Characterization of Bacillus Anthracis Replication and Persistence on Environmental Substrates Associated with Wildlife Anthrax Outbreaks. **PLOS ONE**, v. 17, n. 9, p. e0274645, 21 set. 2022.

KATATA, G.; CHINO, M.; KOBAYASHI, T.; TERADA, H.; OTA, M.; NAGAI, H.; KAJINO, M.; DRAXLER, R.; HORT, M. C.; MALO, A.; TORII, T.; SANADA, Y. 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. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 2, p. 1029–1070, 30 jan. 2015.

KAVIANI, F.; MEMARIAN, M. H.; ESLAMI-KALANTARI, M. Radioactive impact on Iran and the world from a postulated accident at Bushehr Nuclear Power Plant. **Progress in Nuclear Energy**, v. 142, n. July 2020, p. 103991, 2021.

KIM, K. H.; KABIR, E.; JAHAN, S. A. Airborne bioaerosols and their impact on human health. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 67, p. 23–35, 2018.

KNIGHT, D. COVID-19 Pandemic Origins: Bioweapons and the History of Laboratory Leaks. **Southern Medical Journal**, v. 114, n. 8, p. 465–467, ago. 2021.

KNUST, I. C. **Produção Pública de Medicamentos: desafios e perspectivas**. A importância da Produção Pública Nacional de Medicamentos Estratégicos na Área Radiológica e Nuclear e sua relevância para o Programa Nuclear da Marinha do Brasil. 2013. Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2013.

LCSPES. **Manual de Biossegurança do Laboratório Central de Saúde Pública do**

Espírito Santo. Governo do Estado do Espírito Santo, 2019. Disponível em: <https://saude.es.gov.br/Media/sesa/LACEN/MAN.NQ01.003%20-%20REV%2003%20-%20MANUAL%20DE%20BIOSSEGURANCA%20.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

LEELŐSSY, Á.; MÉSZÁROS, R.; KOVÁCS, A.; LAGZI, I.; KOVÁCS, T. Numerical Simulations of Atmospheric Dispersion of Iodine-131 by Different Models. **PloS One**, v. 12, n. 2, p. e0172312, 2017.

LEELŐSSY, Á.; MOLNÁR, F.; IZSÁK, F.; HAVASI, Á.; LAGZI, I.; MÉSZÁROS, R. Dispersion Modeling of Air Pollutants in the Atmosphere: A Review. **Central European Journal of Geosciences**, v. 6, n. 3, p. 257–278, 1 set. 2014.

LI, G.; CHEN, Q.; ZHU, Y.; SUN, W.; GUO, W.; ZHANG, R.; ZHU, Y.; SHE, J. Effects of chemical boundary conditions on simulated O₃ concentrations in China and their chemical mechanisms. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159500, 20 jan. 2023.

LIMA, C.; BUENO, L. **Território, participação popular e saúde: Manguinhos em debate.** Rio de Janeiro: Escola Nacional de Saúde Pública/Fundação Oswaldo Cruz, 2010.

LIU, Y.; LI, Y.; WANG, Q.; FU, J.; JI, F. Sporadic Human Cutaneous Anthrax Outbreak in Shaanxi Province, China: Report of Two Cases from 2018. **Brazilian Journal of Infectious Diseases**, v. 24, p. 81–84, 6 abr. 2020.

MA, Y.; WANG, M.; WANG, S.; WANG, Y.; FENG, L.; WU, K. Air Pollutant Emission Characteristics and HYSPLIT Model Analysis during Heating Period in Shenyang, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 1, p. 9, 14 dez. 2020.

MA, Y.; ZHAO, H.; WEI, X. Changes of air pollutants and simulation of a heavy pollution process during COVID-19 in Shenyang. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 10, p. 723, 2022.

MAGALHÃES, J. L. de O. **Sistema de Gestão de Qualidade e Biossegurança no Laboratório de Biossegurança Nível 3 da Fiocruz/PE: elaboração de proposta para implantação.** 2013. Centro de Pesquisas Aggeu Magalhães, FIOCRUZ, Recife, 2013. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/handle/icict/31926/2013magalhaes-jlo.pdf?sequence=2>. Acesso em: 1 mar. 2021.

MALIZIA, A.; ANTONELLI, L.; ARESCO, S.; ASPETTI, P. C.; ASTORINO, S.; BARLETTA, T.; BELLECCI, C.; BUCCI, A.; CACCIOTTI, I.; CAPOBIANCO, L.; CARESTIA, M.; DI GIOVANNI, D.; CARMINATI, G.; CENCIARELLI, O.; CORRAO, S.; D'AMICO, F.; DE MASI, D.; FERRARI, G.; FIORITO, R.; FONTANA, C.; FRUSTERI, L.; GAUDIO, P.; GUCCIARDINO, A.; LUTTAZZI, E.; MATRONE, G.; MARCHI, F.; MINGHETT, S.; PALOMBI, L.; PERGOLINI, A.; PERRIMEZZI, C.; PIERNO, L.; PIOLETTI, S.; PIRELLI, F.; RICCIO, R.; ROTHBACHER, D.; ROTONDI, L.; RUSSO, C.; SALUCCI, L.; SASSOLINI, A.; SOREMIC, F.; TROMBADORE, V.; UNALI, F. Disaster management in case of CBRNe events: an innovative methodology to improve the safety knowledge of advisors and first responders. **Defense and Security Analysis**, v. 32, n. 1, p. 79–90, 2016.

MANHEIM, D.; LEWIS, G. High-risk human-caused pathogen exposure events from 1975-

2016. **F1000Research**, v. 10, n. 752, p. 1–20, 2022.

MB. MARINHA DO BRASIL. COMANDO-GERAL DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS (ed.). **Manual de Defesa Nuclear, Química, Biológica e Radiológica**. Ministério da Defesa: Marinha do Brasil, 2018.

MÉNARD, A. D.; TRANT, J. F. A Review and Critique of Academic Lab Safety Research. **Nature Chemistry**, v. 12, n. 1, p. 17–25, jan. 2020.

MENDES, J. V.; ARMOND, N. B.; BIZERRA DA SILVA, L. C. Ilhas de calor urbanas de superfície, ondas de calor e de frio no município do Rio de Janeiro – RJ (2015 - 2019). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, p. 133–155, 2022.

MOHAMMED SAEED, I. M.; MOHAMMED SALEH, M. A.; HASHIM, S.; BIN RAMLI, A. T.; AL-SHATRI, S. H. H. Atmospheric Dispersion Modeling and Radiological Safety Assessment for Expected Operation of Baiji Nuclear Power Plant Potential Site. **Annals of Nuclear Energy**, v. 127, p. 156–164, 1 maio 2019.

MOHAMMED SAEED, I. M.; SALEH, M. A. M.; HASHIM, S.; HAMA, Y. M. S.; HAMZA, K.; AL-SHATRI, S. H. The radiological assessment, hazard evaluation, and spatial distribution for a hypothetical nuclear power plant accident at Baiji potential site. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, n. 1, p. 6, 24 jan. 2020.

MONROY-COLÍN, A.; MAYA-MANZANO, J. M.; TORMO-MOLINA, R.; PECERO-CASIMIRO, R.; GONZALO-GARIJO, M. Á.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, S. HYSPLIT as an Environmental Impact Assessment Tool to Study the Data Discrepancies between Olea Europaea Airborne Pollen Records and Its Phenology in SW Spain. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 53, p. 126715, 1 ago. 2020.

MORAES, N. O.; MARTON, E.; PIMENTEL, L. C. G. Análise do Desempenho dos Modelos MM5 e WRF na Simulação da Temperatura do Ar em Superfície na RMRJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 161–168, 1 dez. 2014.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Ambiente & Sociedade**, v. VII, n. 2, 2004.

MS. Ministério da Saúde. **Plano de Contingência para Emergências em Saúde Pública por Agente Químico, Biológico, Radiológico e Nuclear**. 2014.

MUSEWA, A.; MIREMBE, B. B.; MONJE, F.; BIRUNGI, D.; NANZIRI, C.; ACENG, F. L.; KABWAMA, S. N.; KWESIGA, B.; NDUMU, D. B.; NYAKARAHUKA, L.; BUULE, J.; COSSABOOM, C. M.; LOWE, D.; KOLTON, C. B.; MARSTON, C. K.; STODDARD, R. A.; HOFFMASTER, A. R.; ARIO, A. R.; ZHU, B.-P. Outbreak of cutaneous anthrax associated with handling meat of dead cows in Southwestern Uganda, May 2018. **Tropical Medicine and Health**, v. 50, p. 52, 6 ago. 2022.

NAKPAN, W.; YERMAKOV, M.; INDUGULA, R.; JANDAROV, R.; REPONEN, T.; GRINSHPUN, S. A. Inactivation of Aerosolized Bacillus Anthracis Surrogate Spores in Close Proximity to the Flame: Simulation Study. **Journal of Aerosol Science**, v. 128, p. 72–78, 1 fev. 2019.

NCAR - NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. **About | Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory**. Institucional. Disponível em: <https://www.mmm.ucar.edu/about>. Acesso em: 5 nov. 2021.

NCEP/NWS/NOAA/US. **NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids** Boulder, CO. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>. Acesso em: 24 ago. 2022.

NEGRÉ, W. S. **Proposta de protocolos de segurança para a prevenção, a contenção e a neutralização de agente agressor bioativo em incidentes bioterroristas e estudo por docking molecular do fator letal do *Bacillus anthracis* (Antraz)**. 2010. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

NEVES, M. B. das. **Terrorismo químico: o papel do Hospital de Força Aérea do Galeão (HFAG) no atendimento de vítimas**. 2016. Universidade da Força Aérea, 2016.

NOAA. **NOAA HYSPLIT Trajectory Model**. Institucional. Disponível em: <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtime=archive>. Acesso em: 22 set. 2020.

NOAA. **Short-Range Dispersion Simulation**. Institucional. Disponível em: https://www.ready.noaa.gov/documents/Tutorial/html/conc_local.html. Acesso em: 22 set. 2021.

NOAA. **About HYSPLIT**. Institucional. Disponível em: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>. Acesso em: 27 jan. 2022.

NOAA. **HYSPLIT components: meteorology, trajectories, dispersion, and air concentration**. Institucional. Disponível em: <https://www.ready.noaa.gov/documents/Tutorial/html/intro.html>. Acesso em: 21 set. 2022.

NOAA. **HYSPLIT Limitations**. Disponível em: <https://www.ready.noaa.gov/hypub/limitations.html>. Acesso em: 11 jun. 2021.

NORRIS, M. H.; KIRPICH, A.; BLUHM, A. P.; ZINCKE, D.; HADFIELD, T.; PONCIANO, J. M.; BLACKBURN, J. K. Convergent evolution of diverse *Bacillus anthracis* outbreak strains toward altered surface oligosaccharides that modulate anthrax pathogenesis. **PLOS Biology**, v. 18, n. 12, p. e3001052, 28 dez. 2020.

OKE, T. R. Urban environments. In: BAYLE, W. G.; OKE, T. R.; ROUSE, W. R. (org.). **The Surface Climates of Canada**. Montreal: McGill-Queen's University Press, 1997. 303–327 p.

OLIVEIRA, A. C. de. **Implementação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para a Bacia de União da Vitória**. 2006. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/124-Alex_Conselvan_de_Oliveira.pdf. Acesso em: 11 jun. 2022.

OLSEN, Y.; GOSEWINKEL, U. B.; SKJØTH, C. A.; HERTEL, O.; RASMUSSEN, K.;

SIGSGAARD, T. Regional Variation in Airborne Alternaria Spore Concentrations in Denmark through 2012–2015 Seasons: The Influence of Meteorology and Grain Harvesting. *Aerobiologia*, v. 35, n. 3, p. 533–551, 1 set. 2019.

OPAS. **Manual de Biossegurança Laboratorial. Quarta Edição.** [s.l.] Pan American Health Organization, 2021.

PALÁCIOS, R. D. S.; SALLO, F. D. S.; MARQUES, J. B.; SANTOS, A. C. A.; MENEZES, J. A.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. D. S. Variabilidade Espaço-Temporal Da Profundidade Ótica De Aerossóis Em Regiões De Cerrado E Pantanal Na Região Central Do Brasil. *Nativa*, v. 6, n. 1, p. 56, 2018.

PENNA, P. M. M.; AQUINO, C. F.; CASTANHEIRA, D. D.; BRANDI, I. V.; CANGUSSU, A. S. R.; MACEDO SOBRINHO, E.; SARI, R. S.; SILVA, M. P. da; MIGUEL, Â. S. M. BIOSSEGURANÇA: UMA REVISÃO. *Arquivos do Instituto Biológico*, v. 77, n. 3, p. 555–565, set. 2010.

PEREIRA, A. P. M. F. **Habitação saudável nas obras do Programa de Aceleração do Crescimento na Comunidade DSUP, Complexo de Manguinhos, RJ.** 2013. Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/handle/icict/24343/adriana_paula_macedo_ferreira_perreira_ensp_mest_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 4 abr. 2018.

PEREIRA, A. P. M. F.; RODRIGUES, L. A. da C.; SANTOS, E. A. dos; CARDOSO, T. A. de O.; COHEN, S. C. Gestão de eventos QBRN e a utilização do modelo Hysplit: uma revisão integrativa de literatura. *Saúde em Debate*, v. 43, n. 122, p. 925–938, set. 2019.

PERES, F. Biossegurança, saúde, ambiente e comunicação de riscos: um debate necessário. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, p. 294–297, fev. 2012.

PERINI DE SOUZA, N. B.; SPERANDIO NASCIMENTO, E. G.; BANDEIRA SANTOS, A. A.; MOREIRA, D. M. Wind mapping using the mesoscale WRF model in a tropical region of Brazil. *Energy*, v. 240, p. 122491, 1 fev. 2022.

PETRUCELLI, M. R. **Biotecnologia, bioética, biodireito, biossegurança e biodefesa no contexto DQBRNE: atualidade, perspectivas e desafios.** 2014. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/7043>. Acesso em: 17 out. 2022.

PILO, P.; FREY, J. Pathogenicity, Population Genetics and Dissemination of Bacillus Anthracis. *Infection, Genetics and Evolution*, v. 64, p. 115–125, 1 out. 2018.

PIMENTEL, L. C. G.; MARTON, E.; DA SILVA, M. S.; JOURDAN, P. Caracterização do regime de vento em superfície na região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2014.

PIROUZMAND, A.; KOWSAR, Z.; DEGHANI, P. Atmospheric dispersion assessment of radioactive materials during severe accident conditions for Bushehr nuclear power plant using HYSPLIT code. *Progress in Nuclear Energy*, 2018.

PONSEEL, G.; FILLON, C.; SCHULIAR, Y. Recommandations pour la prise en charge et l'identification des victimes décédées suite à une catastrophe de type nucléaire-radiologique-biologique-chimique (NRBC). **La Revue de Médecine Légale**, v. 2, n. 3, p. 94–107, 1 ago. 2011.

PRATHER, K. A.; MARR, L. C.; SCHOOLEY, R. T.; MCDIARMID, M. A.; WILSON, M. E.; MILTON, D. K. Airborne transmission of SARS-CoV-2. **Science**, v. 370, n. 6514, p. 303–304, 16 out. 2020.

PRINSLOW, K. **Spatial Analysis Of A Bioterrorist Attack On Four Major United States Cities Using An Aerosolized Hemorrhagic Fever Virus**. 2011. Fort Hays State University, Kansas, 2011. Disponível em: <https://scholars.fhsu.edu/theses/155/>. Acesso em: 3 maio. 2017.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE, 2013. 277 p.

PRUEKSAKORN, K.; KIM, T.; KIM, S.; KIM, H.; KIM, K. Y.; SON, W.; VONGMAHADLEK, C. Review of Air Dispersion Modelling Approaches to Assess the Risk of Wind-Borne Spread of Foot-and-Mouth Disease Virus. **Journal of Environmental Protection**, v. 3, n. 9, p. 1260–1267, 27 set. 2012.

QIN, X.; LI, Y.; SUN, X.; MENG, L.; WANG, X. Transport Pathway and Source Area for Artemisia Pollen in Beijing, China. **International Journal of Biometeorology**, v. 63, n. 5, p. 687–699, 1 maio 2019.

QUÉRÉ, C. Le; SALTZMAN, Eric. S. **Surface Ocean: lower Atmosphere Process**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013. 329 p.

QUINN, E.; JOHNSTONE, T.; NAJJAR, Z.; CAINS, T.; TAN, G.; HUHTINEN, E.; NILSSON, S.; BURGESS, S.; DUNN, M.; GUPTA, L. Lessons Learned From Implementing an Incident Command System During a Local Multiagency Response to a Legionnaires' Disease Cluster in Sydney, NSW. **Disaster Medicine and Public Health Preparedness**, v. 12, n. 4, p. 539–542, ago. 2018.

RAMANA, M. V.; NAYYAR, A. H.; SCHOEPPNER, M. Nuclear High-level Waste Tank Explosions: Potential Causes and Impacts of a Hypothetical Accident at India's Kalpakkam Reprocessing Plant. **Science and Global Security**, 2016.

RIBEIRO, C. H. de C. **Capacitação de Médicos da Marinha do Brasil para a Resposta a Acidentes Nucleares e Radiológicos**. 2014. Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2014.

ROCHA, S. S. D. Invisibilidade de situações de risco biológico no campo da Saúde Pública: desafios de biossegurança e biosseguridade. p. 124, 2011.

RODRIGUES, J. P. **Modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos como etapa de pré-seleção de locais para instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar em Paranaguá - PR**. 2016. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/1850>. Acesso em: 21 set. 2022.

ROLPH, G. D.; NGAN, F.; DRAXLER, R. R. Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model. **Journal of Environmental Radioactivity**, 2014.

ROSSODIVITA, A.; VISCONTI, A.; SAPORITO, T.; RIZZARDINI, G. Bioterrorism: toxins as potential biological weapons - an emerging global health threat. **International Journal of Infectious Diseases**, v. 79, n. 2019, p. 55, 2019.

RYAN, J. R. **Biosecurity and Biological**:Containing and Preventing Biological Threats. 2. ed. Cambridge: Elsevier Inc, 2016.

SADYŚ, M. Effects of Wind Speed and Direction on Monthly Fluctuations of Cladosporium Conidia Concentration in the Air. **Aerobiologia**, v. 33, n. 3, p. 445–456, 1 set. 2017.

SADYŚ, M.; KENNEDY, R.; SKJØTH, C. A. An Analysis of Local Wind and Air Mass Directions and Their Impact on Cladosporium Distribution Using HYSPLIT and Circular Statistics. **Fungal Ecology**, v. 18, p. 56–66, 1 dez. 2015.

SAGO. **WHO Scientific Advisory Group for the Origins of Novel Pathogens (SAGO): preliminary report of the SAGO**. Geneva: World Health Organization, 9 jun. 2022. . Disponível em: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/scientific-advisory-group-on-the-origins-of-novel-pathogens/sago-report-09062022.pdf?sfvrsn=42b55bbc_1&download=true. Acesso em: 20 ago. 2022.

SALAZAR, M. P. **Estudo sobre a modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais em análise quantitativa de risco**. 2016. Universidade de São Paulo, 2016.

SALGADO, J. R.; RABINOVITCH, L.; GOMES, M. de F. dos S.; ALLIL, R. C. da S.; WERNECK, M. M.; RODRIGUES, R. B.; PICÃO, R. C.; OLIVEIRA LUIZ, F. B. de; VIVONI, A. M. Detection of Bacillus Anthracis and Bacillus Anthracis-like Spores in Soil from State of Rio de Janeiro, Brazil. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 115, p. e200370, 2020.

SALGADO, J. R. S.; RABINOVITCH, L. Antraz: Uma zoonose silenciada. **Revista UpPharma**, n. Set-Out, 2018.

SALGADO, T. A.; REAM, P. S. F.; TELES, S. A.; LIMA, L. K. O. L.; REZENDE, F. R.; CARDOSO, N. Q.; TIPPLE, A. F. V. Accidents with Biologic Material in Health Services among Persons with No Presumed Risk. **American Journal of Infection Control**, v. 44, n. 12, p. 1726–1728, 1 dez. 2016.

SANDSTRÖM, B. E.; ERIKSSON, H.; NORLANDER, L.; THORSTENSSON, M.; CASSEL, G. Training of public health personnel in handling CBRN emergencies: A table-top exercise card concept. **Environment International**, v. 72, p. 164–169, 2014.

SANTOS, E. A. dos; VALERIANO, C. de M.; SILVA, C. Associação entre poeira mineral e o clima. **Terrae Didatica**, v. 14, n. 1, p. 69–79, 5 jun. 2018.

SANTOS, M. T. da R.; SILVA, M. V. de C.; CARDOSO, T. A. de O. Sistema de Comando de Incidentes e comunicação de risco: reflexões a partir das emergências nucleares. **Saúde em Debate**, v. 44, n. spe2, p. 98–114, jul. 2020.

SCHEID, N. M. J. Temas controversos no ensino de Ciências: apontamentos de natureza ética. **Diálogo**, v. 19, p. 65–79, 2011.

SCHILD, A. L.; SALLIS, E. S. V.; SOARES, M. P.; LADEIRA, S. R. L.; SCHRAMM, R.; PRIEBE, A. P.; ALMEIDA, M. B.; RIET-CORREA, F. Anthrax in Cattle in Southern Brazil: 1978-2006. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 26, p. 243–248, dez. 2006.

SCHMITT, K.; ZACCHIA, N. A. Total Decontamination Cost of the Anthrax Letter Attacks. **Biosecurity and Bioterrorism: Biodefense Strategy, Practice, and Science**, v. 10, n. 1, p. 98–107, mar. 2012.

SEIDE, K. S. **Estudo da radiação solar no município de Rio Grande, RS: dados meteorológicos e simulação**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2019.

SEIFRIED, J. S. **Diversity and dynamics of bacterial populations in marine bioaerosols**. 2014. Jacobs University, 2014.

SEOK, Y.; LEE, J.; KIM, M.-G. Paper-Based Airborne Bacteria Collection and DNA Extraction Kit. **Biosensors**, v. 11, n. 10, p. 375, out. 2021.

SESARTIC, A.; DALLAFIOR, T. N. Global fungal spore emissions, review and synthesis of literature data. **Biogeosciences**, v. 8, n. 5, p. 1181–1192, 2011.

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**. 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/004/45004885.pdf. Acesso em: 24 abr. 2017.

SILVA, C. M. ; TSURUTA, F. ; RODRIGUES, J. C. ; VIEIRA, F. ; ARBILLA, G. Simulação das Trajetórias de Poluentes em Eventos Naturais e Antropogênicos. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, p. 1828–1848, 2018.

SILVA, A. P. da; DUARTE, C. dos S.; OLIVEIRA, D. B. C. de; HOLANDA, M. A. C. R. de; NETO, N. de A. A.; SOARES, W. de A. Diferentes Aspectos do Uso de Modelos Computacionais Aplicados às Ciências Ambientais. **Revista Diálogos**, p. 315–342, 2014.

SILVA, M. S. da. **Estratégias de simulação da dispersão de poluentes com os modelos WRF/CALMET/CALPUFF para a região metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-pem_upl//THESIS/22/pemufrj2012mscmauriciosoaresdasilva.pdf. Acesso em: 15 mar. 2020.

SILVEIRA, W. W. da; CARVALHO, V. S. B. Avaliação das Condições Meteorológicas Simuladas pelo Modelo WRF na Região Metropolitana do Rio de Janeiro em Dias Com Altas

Concentrações de Poluentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 317–325, 24 maio 2021.

SIMSEK, V.; POZZOLI, L.; UNAL, A.; KINDAP, T.; KARACA, M. Simulation of ¹³⁷Cs transport and deposition after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident and radiological doses over the Anatolian Peninsula. **Science of The Total Environment**, p. 74–88, 2014.

SKAMAROCK, C.; KLEMP, B.; DUDHIA, J.; GILL, O.; LIU, Z.; BERNER, J.; WANG, W.; POWERS, G.; DUDA, G.; BARKER, D.; HUANG, X. **A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3**. 2021. Disponível em: <https://openky.ucar.edu/islandora/object/technotes%3A588/>. Acesso em: 4 out. 2022.

SKJØTH, C. A.; BILIŃSKA, D.; WERNER, M.; MALKIEWICZ, M.; ADAMS-GROOM, B.; KRYZA, M.; DRZENIECKA-OSIADACZ, A. Footprint Areas of Pollen from Alder (*Alnus*) and Birch (*Betula*) in the UK (Worcester) and Poland (Wrocław) during 2005–2014. **Acta Agrobotanica**, v. 68, n. 4, p. 315–323, 31 dez. 2015.

SKRYNYK, O.; VOLOSHCHUK, V.; BUDAK, I.; BUBIN, S. Regional HYSPLIT Simulation of Atmospheric Transport and Deposition of the Chernobyl ¹³⁷Cs Releases. **Atmospheric Pollution Research**, v. 10, n. 6, p. 1953–1963, 1 nov. 2019.

SMAC. **Qualidade do Ar na Cidade do Rio de Janeiro**. Relatório da Rede MonitorAr-Rio. 2018.

SOUSA, J. M. de; CANDIDO, L. A.; SILVA, J. T. da; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; MANZI, A. O.; SOUZA, R. A. F. de; SOUZA, E. B. de; VIEIRA, S. de O. Avaliação da Habilidade do Modelo WRF em Representar a Precipitação na Amazônia Usando Diferentes Escalas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 255–273, jun. 2019.

SOUZA, E. F. **Simulação numérica da dispersão atmosférica de resíduos gasosos provenientes do Aterro Comum de Bom Sucesso - RN**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018.

SPARTA, D. M. B. **O estado da arte do arcabouço jurídico em desastre QBRN no Brasil**. 2022. Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2022.

STEFANATI, A.; BROSIO, F.; KUHDARI, P.; BACCELLO, V.; DE PARIS, P.; NARDINI, M.; BOSCHETTO, P.; LUPI, S.; GABUTTI, G. [Incidence of biological accidents at work and immune status for vaccine-preventable diseases among resident physicians in specialist training at Ferrara University Hospital]. **Igiene E Sanita Pubblica**, v. 73, n. 6, p. 633–648, dez. 2017.

STEIN, A. F.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D.; NGAN, F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. 2059–2077, 1 dez. 2015.

TADANO, Y. S.; MAZZA, R. A.; TOMAZ, E. Modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos no município de paulínia (brasil) empregando o iscst3. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**, v. XXIX, n. x, p. 8125–8148, 2010.

UW OCCUPATIONAL MEDICINE. **Anthrax (*Bacillus anthracis*) Exposure Medical Response Guidance for the University of Wisconsin-Madison**. University of Wisconsin-Madison, 2015. Disponível em: https://www.medicine.wisc.edu/sites/default/files/anthrax_medical_response_guidance.pdf. Acesso em: 1 jun. 2022.

VALI, R.; ADELIKHAH, M. E.; FEGHHI, S. A. H.; NOORIKALKHORAN, O.; AHANGARI, R. Simulation of radionuclide atmospheric dispersion and dose assessment for inhabitants of Tehran province after a hypothetical accident of the Tehran Research Reactor. **Radiation and Environmental Biophysics**, 2018.

VALVERDE, N.; MAURMO, T. L. A. **Manual de ações médicas em emergências radiológicas**. Capax Dei editora, 2010.

VAN LEUKEN, J. P. G.; SWART, A. N.; HAVELAAR, A. H.; PUL, A. V.; HOEK, W. V. der; HEERERIK, D. Atmospheric Dispersion Modelling of Bioaerosols That Are Pathogenic to Humans and Livestock – A Review to Inform Risk Assessment Studies. **Microbial Risk Analysis**, v. 1, p. 19–39, 2016.

VARGA, T.; PALCSU, L.; OHTA, T.; MAHARA, Y.; JULL, A. J. T.; MOLNÁR, M. Variation of ¹⁴C in Japanese Tree Rings Related to the Fukushima Nuclear Accident. **Radiocarbon**, v. 61, n. 4, p. 1029–1040, 2019.

VASCONCELOS, A. M. C. de. As operações de defesa química biológica radiológica e nuclear nos grandes eventos. **Doutrina Militar Terrestre em Revista**, p. 42–21, 2018.

VASILEVA, P.; YANEVA, S. Analysis and Evaluation of the EU Action Plan to Enhance Preparedness Against Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Security Risk and the National Program for its Implementation of the EU CBRN Action Plan in the Republic of Bulgaria. **Science. Business. Society.**, v. 37, n. 1, p. 35–37, 2018.

VISSCHER, A. de. **Air Dispersion Modeling: foundations and applications**. New Jersey: Wiley, 2014.

WADMAN, M.; COHEN, J. NIH Move to Ax Bat Coronavirus Grant Draws Fire. **Science** (New York, N.Y.), v. 368, n. 6491, p. 561–562, 8 maio 2020.

WEISS, S.; YITZHAKI, S.; SHAPIRA, S. C. Lessons to Be Learned from Recent Biosafety Incidents in the United States. **The Israel Medical Association journal: IMAJ**, v. 17, n. 5, p. 269–273, maio 2015.

WILLIAMS, G.; LINLEY, E.; NICHOLAS, R.; BAILLIE, L. The Role of the Exosporium in the Environmental Distribution of Anthrax. **Journal of Applied Microbiology**, v. 114, n. 2, p. 396–403, 2013.

WU, J.-L.; WANG, Y.; SUN, W.; LUO, W.-L.; WANG, Y.-J.; ZHANG, B. Atmospheric radionuclides from Fukushima Dai-ichi nuclear accident detected in Lanzhou, China. **NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES**, v. 26, p. 40604, 2015.

WU, Z.; JIN, Q.; WU, G.; LU, J.; LI, M.; GUO, D.; LAN, K.; FENG, L.; QIAN, Z.; REN, L.;

TAN, W.; XU, W.; YANG, W.; WANG, J.; WANG, C. SARS-CoV-2's Origin Should Be Investigated Worldwide for Pandemic Prevention. **Lancet (London, England)**, v. 398, n. 10308, p. 1299–1303, 9 out. 2021.

YANG, G.; OU, W. Dynamic Surveillance System for Contamination Accidents in Chemical Industry Park Based on Internet of Things. **Chemical Engineering Transactions**, v. 71, p. 547–552, 1 dez. 2018.

YOO, K.; LEE, T. K.; CHOI, E. J.; YANG, J.; SHUKLA, S. K.; HWANG, S.; PARK, J. Molecular Approaches for the Detection and Monitoring of Microbial Communities in Bioaerosols: A Review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 51, p. 234–247, 2017.

ZEMMER, F.; KARACA, F.; OZKARAGOZ, F. Ragweed pollen observed in Turkey: Detection of sources using back trajectory models. **Science of The Total Environment**, v. 430, p. 101–108, 2012.

ZHANG, Z.; NINOMIYA, K.; TAKAHASHI, N.; SHINOHARA, A. 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. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 2015.

APÊNDICE I – ARTIGO “GESTÃO DE EVENTOS QBRN E A UTILIZAÇÃO DO MODELO HYSPLIT: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DE LITERATURA”

Artigo publicado no volume 43 da Revista Saúde em Debate (2019). DOI: 10.1590/0103-1104201912221. Disponível no [link: https://www.scielo.br/j/sdeb/a/x7hSt6kfWnpqKhVqS6HJssk/?lang=pt](https://www.scielo.br/j/sdeb/a/x7hSt6kfWnpqKhVqS6HJssk/?lang=pt). Revista de acesso aberto, que autoriza a reprodução do artigo de forma integral no corpo da tese.

REVISÃO | REVIEW 925

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. open@iobq@mistil.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.

 Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições, desde que o trabalho original seja corretamente citado.

SAÚDE DEBATE | RIO DE JANEIRO, V. 43, N. 122, P. 925-938, JUL-SET, 2019

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, passando 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 sarín 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^{2,10}.

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.

Leelőssy 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 integra.

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.

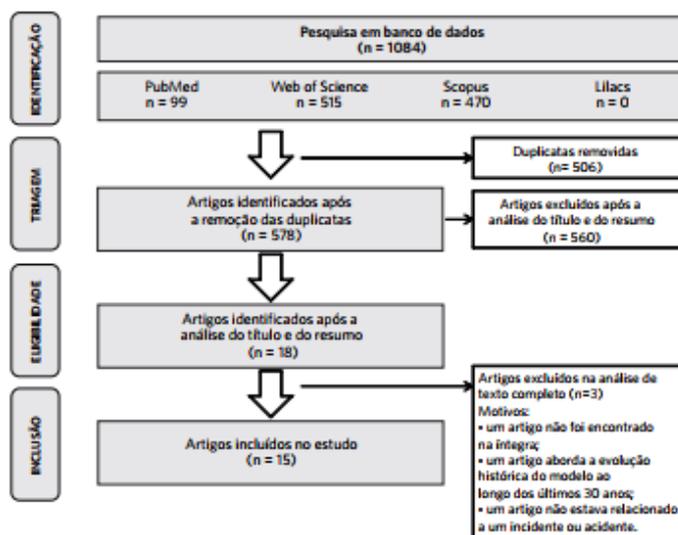
Foram realizadas reuniões de consenso com outros pesquisadores quando havia dúvidas sobre a inclusão de estudos na revisão. Os

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 kriptônio-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.
Prouzmand, 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 Schoeppner (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 e 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 prever 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.¹⁴⁻¹⁸ 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 césio-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, céσιο-134 e céσιο-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 céσιο-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 céσιο-137 sobre a Turquia, a partir dos dados do Atlas de Céσιο 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 radiocripton-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 céσιο 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 Schoepner (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); Prouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoepner (2016); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Simsek et al. (2014); Valli 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); Prouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoepner (2016); Rolph, Ngan, Draxler (2014); Simsek et al. (2014); Valli et al. (2018).
	Preparação	Auxier, Auxier e Hall (2017); Leelossy et al. (2017); Prouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Valli 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); Prouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoepner (2016); Rolph, Ngan e Draxler (2014); Silva et al. (2018); Valli 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.)

Trajetória	Backward	Katata et al. (2015); Wu et al. (2015).
	Forward	An et al. (2016); Auxier, Auxier e Hall (2017); Chai, Draxler e Stein (2015); Felsberg et al. (2018); Ge'Yang e Ou (2018); Leelossy et al. (2017); Prouzmand, Kowsar e Dehghani (2018); Ramana, Nayyar e Schoeppner (2016); Rolph, Nigan e Draxler (2014); Silva et al. (2018); Simsek et al. (2014); Vali et al. (2018); Zhang et al. (2015).
Dados meteorológicos	In situ	An et al. (2016); Vali et al. (2018).
	Bases de dados locais	Auxier, Auxier e Hall (2017); Felsberg et al. (2018); Ge'Yang e Ou (2018); Katata et al. (2015); Rolph, Nigan e Draxler (2014); Simsek et al. (2014).
	GDAS	Chai, Draxler e Stein (2015); Leelossy et al. (2017); Prouzmand, 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 km)³¹. 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/rsres/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 BIOCOUNTER 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 - R.J. [tese] - Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2013.
- Leelossy 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):243-251.
24. Ramana MV, Nayyar AH, Schoepner 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. Piroozmand 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

APÊNDICE II – METOLOGIA DAS REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS INTEGRATIVAS

No sentido de conhecer como o modelo HYSPLIT é utilizado no contexto da gestão de eventos QBRN e de demonstrar como o modelo é empregado para simular a dispersão de agentes biológicos em áreas urbanas foram elaboradas duas revisões integrativas de literatura a partir da leitura de artigos científicos indexados nas bases de dados informatizadas *National Library of Medicine* (PubMed), Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (Lilacs), *SciVerse Scopus* (Scopus) e *Web of Science* (WOS).

Crossetti (2012) afirmou que a revisão integrativa da literatura possibilita a síntese e a análise do conhecimento científico já produzido sobre o tema, interconectando elementos isolados de estudos já existentes.

Os estudos foram delineados conforme as 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.

A busca e a seleção dos artigos foram realizadas nos títulos, resumos e palavras-chave, a partir dos critérios de inclusão e exclusão (**Quadro 10**).

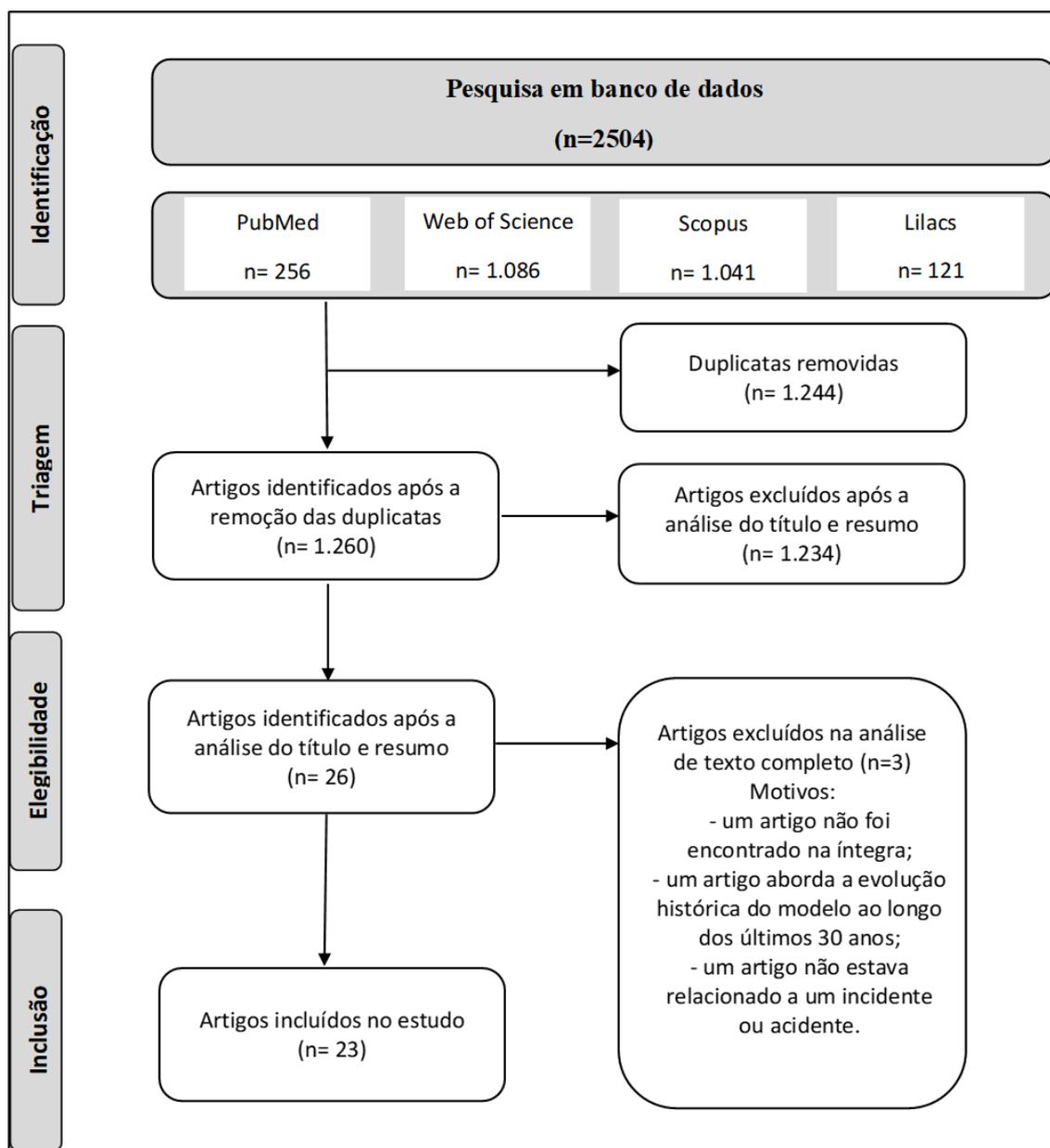
Quadro 10: Elementos para a busca e seleção dos artigos para a elaboração das revisões de literatura.

PERGUNTA NORTEADORA	ESTRATÉGIA DE BUSCA	FILTROS	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
Como o modelo HYSPLIT vem sendo utilizado no contexto da gestão de eventos QBRN?	("Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model" OR HYSPLIT)	- Idioma: inglês, espanhol e português - Período: 2014 a 2018 (artigo publicado na Revista Saúde em Debate em 2019). Para a tese a busca foi refeita e atualizada até 2021. - Material: artigos científicos e/ou artigos de revisão	Estudos que abordassem diretamente a utilização do modelo HYSPLIT em cenários de eventos QBRN.	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.
Como se dá a aplicação do modelo HYSPLIT perante a dispersão de agentes biológicos em áreas urbanas?	((HYSPLIT OR "Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory") AND (aerobiology OR bioaerosol* OR "bio-aerosol*" OR "viable aerosol*" OR biolog* OR *bacill* OR *bacter* OR diptera* OR endotoxin* OR fung* OR helmin* OR insect* OR microbial* OR *microbium* OR microorganism* OR "micro-organism*" OR *microbia* OR parasit* OR pathogen* OR protozo* OR pollen* OR spore* OR toxin* OR *virus* OR zoonotic* OR zoonos*))	- Idioma: inglês, espanhol e português - Período: 2012 a 2021 - Material: artigos científicos e/ou artigos de revisão	Estudos que abordassem o uso do modelo HYSPLIT para modelar/simular a dispersão de agentes biológicos em áreas urbanas.	Artigos que abordassem ambientes marinhos, rurais e/ou desérticos; montanhas, ilhas e lagos; Antártica e Ártico; estivessem relacionados a análise de neve e/ou nuvens, precipitação, granizo; poeira, incêndio e cinzas; versassem apenas sobre a dispersão de substâncias químicas, de metais pesados ou de materiais particulados em geral, sem citar um agente biológico em específico; avaliassem características ópticas ou que analisassem unicamente fenômenos nas escalas continentais ou globais.

Fonte: Elaboração própria

A busca nas bases da primeira revisão retornou 2.504 registros. Foram removidas 1.244 duplicatas, resultando em 1.260 estudos submetidos à triagem do título, resumo e das palavras-chave. Essa triagem removeu 1.234 artigos. Após a leitura do texto completo dos 26 artigos eleitos, 3 foram excluídos e 23 artigos foram selecionados para a elaboração desta revisão (Figura 54).

Figura 54: Fluxograma da seleção dos estudos da primeira revisão integrativa da literatura.

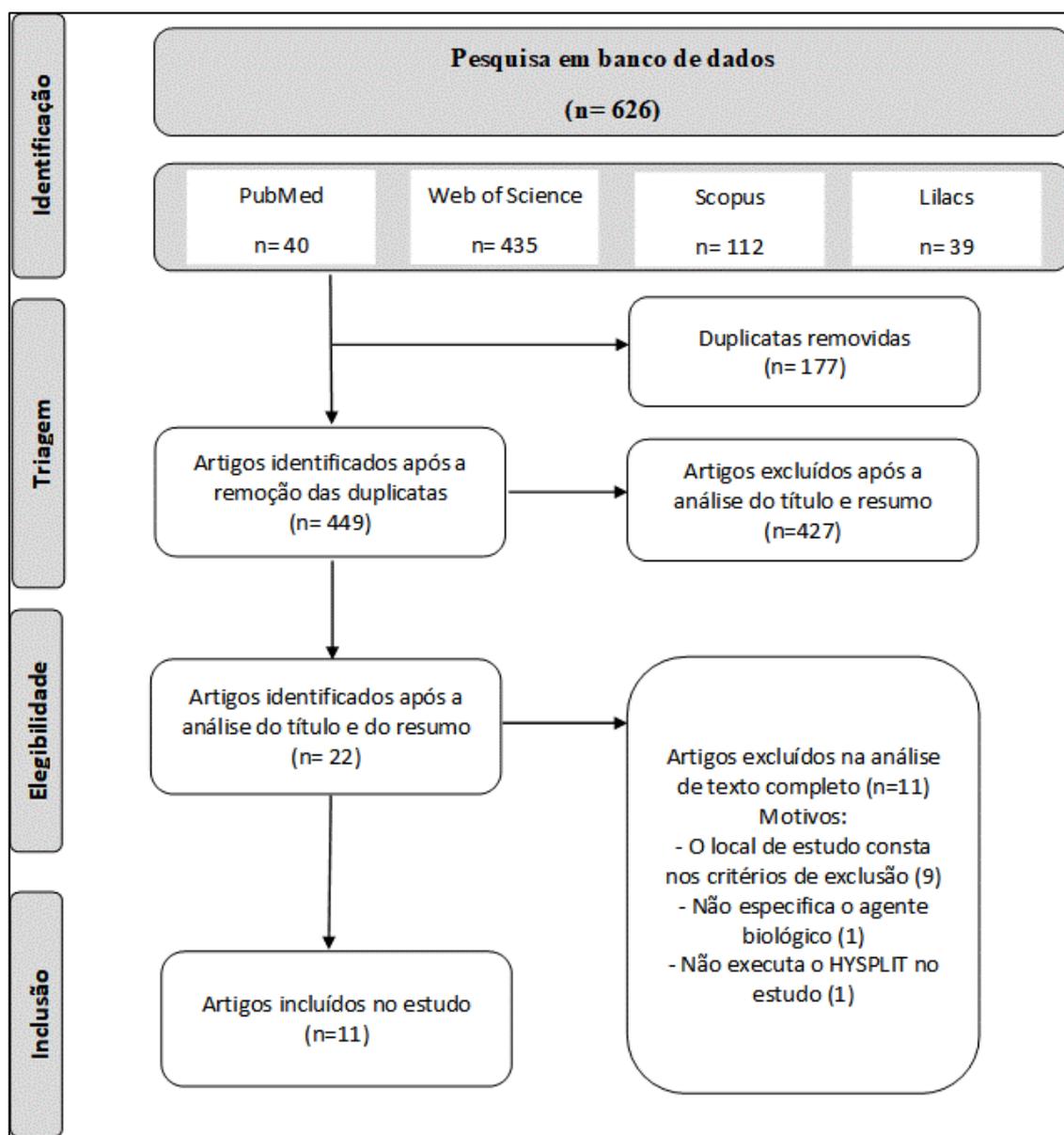


Fonte: Elaboração própria

Já na segunda revisão integrativa de literatura, a busca nas bases científicas selecionadas permitiu a identificação de 626 registros, destes 177 eram duplicatas. Permaneceram 449

materiais para triagem do título, resumo e palavras-chave. Quatrocentos e vinte e sete artigos não atenderam aos critérios de elegibilidade. Restaram 22 estudos para a leitura do texto completo, nos quais 11 artigos foram selecionados para integrar esta revisão e 11 foram excluídos (**Figura 55**).

Figura 55: Fluxograma da seleção dos estudos da segunda revisão integrativa da literatura.



Fonte: Elaboração própria.