

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Ricardo Parreira Bittencourt

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
ORIUNDOS DO AEROPORTO DA PAMPULHA SOBRE A QUALIDADE DO AR LOCAL**

BELO HORIZONTE
2024

Ricardo Parreira Bittencourt

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
ORIUNDOS DO AEROPORTO DA PAMPULHA SOBRE A QUALIDADE DO AR LOCAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientadora: Taciana Toledo de Almeida Albuquerque

BELO HORIZONTE
2024

B624a

Bittencourt, Ricardo Parreira.

Avaliação do impacto da emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha sobre a qualidade do ar local [recurso eletrônico] / Ricardo Parreira Bittencourt. – 2024.

1 recurso online (135 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Taciana Toledo de Almeida Albuquerque.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Impacto ambiental - Teses. 4. Ar - Qualidade - Teses. 5. Licenciamento ambiental - Teses. 6. Ar - Poluição - Teses. I. Albuquerque, Taciana Toledo de Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

"Avaliação do Impacto da Emissão de Poluentes Atmosféricos Oriundos do Aeroporto da Pampulha Sobre A Qualidade do Ar Local"

RICARDO PARREIRA BITTENCOURT

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profª TACIANA TOLEDO DE ALMEIDA ALBUQUERQUE

Profª ELISA VALENTIM GOULART

Prof. RIZZIERI PEDRUZZI

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Profª. Priscilla Macedo Moura
Almeida Albuquerque
Coordenadora

Profª. Taciana Toledo de
Orientadora

Belo Horizonte, 28 de junho de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Taciana Toledo de Almeida Albuquerque, Professora do Magistério Superior**, em 13/12/2024, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rizzieri Pedruzzi, Membro de comissão**, em 22/01/2025, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elisa Valentim Goulart, Usuário Externo**, em 04/02/2025, às 15:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 05/02/2025, às 13:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3324236** e o código CRC **DB3F9C91**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me prover graças, me proporcionando experiências únicas e sempre colocando pessoas especiais em meu caminho. Se hoje sou esta pessoa, tendo passado pelas experiências que passei e tendo vivido tudo aquilo que vivi, devo tudo a Ele, que sempre me acompanha, me protege, me guia e me ilumina. Também agradeço a toda minha família e, em especial, aos meus pais que sempre foram sinônimo de força, honestidade, perseverança, amor, companheirismo, união, vitória e fé, me apoiando em todos os momentos de dificuldade e celebrando as vitórias. Agradeço também à minha avó materna, já falecida, que sempre confiou no meu potencial e me educou, juntamente com meus pais, provendo amor, carinho, ensinamentos e me ajudando a compreender a importância dos valores morais e éticos, os quais carrego comigo em minha jornada. De maneira especial, agradeço também à minha esposa, que ao longo de quase 10 anos se mostrou e se mostra uma companheira incrível e que me torna uma pessoa melhor a cada dia, me apoiando durante os momentos de incertezas e dúvidas, comemorando os triunfos e me orientando na escolha dos melhores caminhos e decisões. Agradeço também à minha orientadora Taciana, que confiou no meu trabalho mesmo diante dos desafios que se fizeram presentes ao longo do período em que me dediquei ao mestrado, contribuindo no compartilhamento de experiências, preocupações e conhecimentos que positivamente fizeram diferença para a conclusão desta etapa. Também agradeço à liderança da empresa onde exerço minhas atividades laborais, liderança esta que a todo momento me incentivou e me apoiou na participação dos eventos associados ao mestrado, permitindo o meu crescimento pessoal e profissional. Por fim, agradeço também aos demais familiares, bem como colegas pessoais, profissionais e acadêmicos que direta ou indiretamente se fizeram presentes, tornando a vida mais alegre, dinâmica e leve.

RESUMO

Os aeroportos, dentre os quais tem-se o Aeroporto da Pampulha, localizado em Belo Horizonte (MG), podem gerar impactos negativos sobre a qualidade do ar local, motivo pelo qual suas emissões devem ser gerenciadas. O presente trabalho teve por objetivo avaliar localmente a dinâmica da dispersão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha, utilizando, para tanto, o modelo de dispersão atmosférica AERMOD View™. Foram avaliadas as concentrações modeladas de CO, NO₂, SO₂, PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} frente aos padrões da Resolução CONAMA nº 491/2018, Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 e Diretrizes Globais de Qualidade do Ar de 2021 da Organização Mundial da Saúde. Neste sentido, foram estabelecidos dois cenários para a modelagem (“cenário 2015” e “cenário 2015 + 50%”), os quais tiveram como base o inventário mais atualizado publicado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), cujo ano de referência é 2015. Para definição da grade de modelagem da qualidade do ar, em ambos os cenários supramencionados, foi realizado um teste simulando quatro distintas configurações de grade no AERMOD View™, de modo a se identificar a configuração de grade que consistentemente subsidiasse a modelagem da dispersão atmosférica. Observou-se que as concentrações modeladas em todo o domínio, incluindo os 20 pontos receptores discretos (PRD), estiveram integralmente dentro dos supracitados padrões de referência para CO, SO₂, PTS, MP₁₀ e MP_{2,5}. Para o NO₂ foram observadas concentrações superiores aos padrões de referência, não somente em áreas no interior do empreendimento, mas também em PRD’s externos ao aeroporto, como foi o PRD 19 no “cenário 2015” para concentrações anuais, o PRD 1 e o PRD 19 no “cenário 2015 + 50%” para concentrações de 24 horas e o PRD 19 no “cenário 2015 + 50%” para concentrações anuais.

Palavras-chave: AERMOD; dispersão atmosférica; licenciamento ambiental; qualidade do ar; modelo gaussiano.

ABSTRACT

Airports, including Pampulha Airport, located in Belo Horizonte (MG), can generate negative impacts on local air quality, reason why its emissions must be managed. One of the tools used to support this management is the atmospheric dispersion modeling. Thus, using the AERMOD View™ model, the present work aims to locally evaluate the dynamics of the dispersion of air pollutants from Pampulha Airport, comparing the modeled concentrations of CO, NO₂, SO₂, TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} against the standards established by the CONAMA Resolution 491/2018, COPAM Normative Deliberation 248/2023 and the 2021 World Health Organization Global Air Quality Guidelines. Two scenarios were considered for the modeling ("2015 scenario" and "2015 scenario + 50%"), which were based on the most updated inventory published by the environmental agency of Minas Gerais State (FEAM), which reference year is 2015. To define the air quality modeling grid in both scenarios mentioned above, a test was carried out simulating four different grid configurations in AERMOD View™, in order to identify the grid configuration that consistently supported the atmospheric dispersion modeling. It was observed that the modeled concentrations in the entire domain, including the 20 discrete receptor points (DRPs), were fully within the reference standards for CO, SO₂, TSP, PM₁₀ and PM_{2.5}. For NO₂, concentrations higher than the reference standards were observed, not only in areas inside the airport, but also in DRPs outside the airport, such as DRP 19 in the "2015 scenario" for annual concentrations, DRP 1 and DRP 19 in the "2015 scenario + 50%" for 24-hour concentrations, and DRP 19 in the "2015 scenario + 50%" for annual concentrations.

Keywords: AERMOD; atmospheric dispersion; environmental licensing; air quality; gaussian model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclos de vôo padrão em um aeroporto.....	29
Figura 2 – Representação gráfica da troposfera e da Camada Limite Planetária. ...	31
Figura 3 – Representação geral do ciclo da camada limite.	32
Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo, Aeroporto da Pampulha	46
Figura 5 – Normais climatológicas do período de 1991 a 2020 para precipitação acumulada mensal e temperaturas mínima mensal, média mensal e máxima mensal referente à estação meteorológica do INMET 83587, localizada em Belo Horizonte (MG).	47
Figura 6 – Normais climatológicas do período de 1991 a 2020 para nebulosidade mensal referente à estação meteorológica do INMET 83587, localizada em Belo Horizonte (MG).....	48
Figura 7 – Normais climatológicas do período de 1991 a 2020 para intensidade mensal dos ventos referente à estação meteorológica do INMET 83587, localizada em Belo Horizonte (MG).....	48
Figura 8 – Mapa hipsométrico do município de Belo Horizonte (MG), com indicação da localização do Aeroporto da Pampulha.	49
Figura 9 – Mapa de Localização das Estações Meteorológicas de Superfície e Altitude Utilizadas na Modelagem da Dispersão Atmosférica.	53
Figura 10 – Mapa de localização dos pontos receptores discretos definidos para inclusão na modelagem da dispersão atmosférica.....	74
Figura 11 – Rosa dos Ventos da Estação A521 do INMET, contemplando o período de 01/01/2015 a 31/12/2015.....	79
Figura 12 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, janeiro de 2015.	80
Figura 13 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, fevereiro de 2015.	80
Figura 14 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, março de 2015.	80
Figura 15 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, abril de 2015.	80
Figura 16 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, maio de 2015.	80
Figura 17 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, junho de 2015.	80
Figura 18 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, julho de 2015.	81
Figura 19 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, agosto de 2015.	81

Figura 20 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, setembro de 2015.	81
Figura 21 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, outubro de 2015.	81
Figura 22 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, novembro de 2015.	81
Figura 23 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, dezembro de 2015.	81
Figura 24 – Distribuição da frequência de velocidade dos ventos registrados na Estação A521 do INMET, contemplando o período de 01/01/2015 a 31/12/2015.	82
Figura 25 – Classes de uso do solo definidas por meio da ferramenta Land Use Creator, parte integrante do AERMET View™.	84
Figura 26 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 01, NO ₂ (24 horas).	86
Figura 27 – Grade da Configuração ID 01, NO ₂ (24 horas).	86
Figura 28 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 02, NO ₂ (24 horas).	86
Figura 29 – Grade da Configuração ID 02, NO ₂ (24 horas).	86
Figura 30 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 03, NO ₂ (24 horas).	86
Figura 31 – Grade da Configuração ID 03, NO ₂ (24 horas).	86
Figura 32 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 04, NO ₂ (24 horas).	87
Figura 33 – Grade da Configuração ID 04, NO ₂ (24 horas).	87
Figura 34 – Decaimento das concentrações de NO ₂ (“cenário 2015”), período de referência de 1 hora, considerando como local de origem um ponto no interior do Aeroporto da Pampulha e como local final o PRD 12.	90
Figura 35 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).	93
Figura 36 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).	94
Figura 37 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP ₁₀ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).	95
Figura 38 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP ₁₀ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).	96
Figura 39 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP _{2,5} (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).	97
Figura 40 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP _{2,5} (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).	98

Figura 41 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO ₂ (período de referência de 1 hora), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).....	99
Figura 42 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO ₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).....	100
Figura 43 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO ₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).....	101
Figura 44 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO ₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).....	102
Figura 45 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO ₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).....	103
Figura 46 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 8 horas), estando os resultados expressos em ppm (cenário 2015).....	104
Figura 47 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015).....	105
Figura 48 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	111
Figura 49 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	112
Figura 50 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP ₁₀ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	113
Figura 51 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP ₁₀ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	114
Figura 52 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP _{2,5} (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	115
Figura 53 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP _{2,5} (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	116
Figura 54 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO ₂ (período de referência de 1 hora), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	117

Figura 55 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO ₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	118
Figura 56 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO ₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	119
Figura 57 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO ₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	120
Figura 58 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO ₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	121
Figura 59 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 8 horas), estando os resultados expressos em ppm (cenário 2015 + 50%).....	122
Figura 60 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m ⁻³ (cenário 2015 + 50%).....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número total de movimentações (pousos e decolagens) por aeroporto e respectiva posição anual no ranking de movimentações	22
Tabela 2 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 (evidenciados apenas os limites dos poluentes com interface com o presente estudo)	35
Tabela 3 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela DN COPAM nº 248/2023 (evidenciados apenas os limites dos poluentes com interface com o presente estudo)	36
Tabela 4 – Limites de referência estabelecidos na Tabela 0.1 das Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS	37
Tabela 5 – Coordenadas geográficas dos pontos de medição dos dados meteorológicos de superfície e altitude utilizadas na modelagem da dispersão atmosférica (01/01/2015 a 31/12/2015).....	52
Tabela 6 – Configurações previstas para análise da mudança de características da grade da modelagem de dispersão atmosférica.....	55
Tabela 7 – Taxas de emissão por aeronave (j), em 2015, no Aeroporto da Pampulha	60
Tabela 8 – Taxas de emissão para equipamentos de apoio, em 2015, no Aeroporto da Pampulha	70
Tabela 9 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha (tonelada.ano ⁻¹)	71
Tabela 10 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha (g.s ⁻¹ .m ² .10 ⁻⁶)	71
Tabela 11 - Coordenadas geográficas dos pontos receptores discretos definidos para a modelagem da dispersão atmosférica.....	73
Tabela 12 – Resumo das isolinhas de concentração (plumas) geradas para cada cenário modelado.....	75
Tabela 13 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos de outros aeroportos	78
Tabela 14 – Valores utilizados de albedo, razão de Bowen e rugosidade da superfície	85
Tabela 15 – Máximas concentrações modeladas em todo o domínio (cenário 2015)	90
Tabela 16 – Concentrações modeladas para os pontos receptores discretos (cenário 2015)	106
Tabela 17 – Concentrações modeladas para os pontos receptores discretos (cenário 2015 + 50%).....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

µg: micrograma

ABEAR: Associação Brasileira das Empresas Aéreas

ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil

AQG: *Air Quality Guideline*

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CGNA: Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea

CLA: Camada Limite Atmosférica (do inglês, *Atmospheric Boundary Layer* – ABL)

CLC: Camada Limite Convectiva (do inglês, *Convective Boundary Layer* – CBL)

CLE: Camada Limite Estável (do inglês, *Stable Boundary Layer* – SBL)

CLP: Camada Limite Planetária (do inglês, *Planetary Boundary Layer* – PBL)

CO: Monóxido de Carbono

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM: Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais

COV: Compostos Orgânicos Voláteis

CR: Camada Residual (do inglês, *Residual Layer* – RL)

DECEA: Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DEFRA: Departamento de Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido

DN: Deliberação Normativa

EDA: Estudo de Dispersão Atmosférica

ESRL: *Earth System Research Laboratories*

FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais

g: Grama

ha: hectares

ICAO: *International Civil Aviation Organization*

IKIA: Aeroporto Internacional Imam Khomeini

INFRAERO: Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

km: Quilômetro

LAS: Licença Ambiental Simplificada

LOC: Licença de Operação Corretiva

LTDA: Limitada

LTO: *Landing and Take-off Operations*

m: Metro

METAR: *Meteorological Aerodrome Report*

mg: Miligrama

MG: Minas Geras

mm: Milímetro

MP: Material Particulado

MP₁₀: Material Particulado com Diâmetro Aerodinâmico Inferior a 10 micrômetros

MP_{2,5}: Material Particulado com Diâmetro Aerodinâmico Inferior a 2,5 micrômetros

NO₂: Dióxido de Nitrogênio

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NO_x: Óxidos de Nitrogênio

OMS: Organização Mundial da Saúde (do inglês, *World Health Organization – WHO*)

PF: Padrão Final de Qualidade do Ar

PI: Padrão Intermediário de Qualidade do Ar

PIB: Produto Interno Bruto

ppm: Partes por Milhão

PRD: Ponto Receptor Discreto

PTS: Partículas Totais em Suspensão

RAS: Relatório Ambiental Simplificado

REVLO: Revalidação de Licença de Operação

s: Segundo

SBBH: Aeroporto Carlos Drummond de Andrade (Aeroporto da Paumpulha)

SEINFRA: Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade

SIAM: Sistema Integrado de Informação Ambiental

SO₂: Dióxido de Enxofre

SO_x: Óxidos de Enxofre

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

ton: Tonelada

USEPA: *United States Environmental Protection Agency*

USGS: *United States Geological Survey*

WHO: *World Health Organization*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos.....	20
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1.	Panorama da Aviação.....	21
3.2.	Contexto do Licenciamento Ambiental do Aeroporto da Pampulha	23
3.3.	Emissões Atmosféricas Provenientes de Aeroportos.....	27
3.4.	Dispersão Atmosférica	31
3.5.	Padrões de Qualidade do Ar	34
3.6.	Modelagem da Dispersão Atmosférica	37
4	METODOLOGIA	45
4.1	Área de Estudo	46
4.2	Pré-Processamento Meteorológico – AERMET View™	50
4.2.1.	Definição da Área de Domínio e Grade Meteorológica	50
4.2.2.	Dados Meteorológicos de Superfície e Altitude	51
4.2.3.	Uso e Ocupação do Solo.....	53
4.3	Modelagem da Dispersão Atmosférica – AERMOD View™.....	53
4.3.1.	Definição do Domínio e Grade da Modelagem da Dispersão Atmosférica 54	
4.3.2.	Fontes Emissoras, Poluentes de Interesse e Inventário de Emissões Atmosféricas	56
4.3.3.	Levantamento de Dados Topográficos.....	72
4.3.4.	Definição dos Pontos Receptores Discretos	72
4.3.5.	Modelagem da Dispersão Atmosférica.....	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1.	Taxas de Emissão.....	77
5.2.	Pré-Processamento Meteorológico	78
5.3.	Teste de Grade do Domínio da Modelagem de Dispersão Atmosférica	85
5.4.	Modelagem da Dispersão Atmosférica (“cenário 2015”).....	89
5.5.	Modelagem da Dispersão Atmosférica (“cenário 2015 + 50%”).....	109
6	CONCLUSÃO	127
7	RECOMENDAÇÕES	130
	REFERÊNCIAS.....	131

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade e os seus três pilares de transporte, sendo eles o aéreo, o terrestre e o marítimo, estão inseridos na base da sociedade e integram o atual mundo globalizado. Neste contexto, o setor aeroportuário, de especial modo, consiste em um importante vetor logístico, uma vez que, desde os seus primórdios até a época contemporânea, desempenhou e continua desempenhando um papel fundamental no progresso da humanidade. Por meio da aviação viabiliza-se o deslocamento otimizado de pessoas e mercadorias, o fomento da indústria e do comércio, o turismo, o intercâmbio cultural e a geração de empregos diretos e indiretos, se mostrando, assim, como um ramo consolidado e necessário ao desenvolvimento da sociedade. Além disso, também desempenha um papel crucial em situações de emergência e resgate, uma vez que possibilita o rápido transporte de equipes médicas, suprimentos e auxílio humanitário.

A nível nacional, alguns aeroportos brasileiros se destacam em função de sua localização estratégica, infraestrutura e número de movimentações. Inserido no supracitado contexto está o Aeroporto Carlos Drummond de Andrade (SBBH), popularmente conhecido como Aeroporto da Pampulha, o qual está localizado na cidade de Belo Horizonte (MG), a aproximadamente oito quilômetros do centro da capital mineira, consistindo em um polo de manutenção de aeronaves, aviação geral e executiva e que conecta importantes eixos viários e elementos de transporte público (MINAS GERAIS, 2022). Além disso, o Aeroporto da Pampulha figura entre os 20 aeroportos com maior número de movimentações no Brasil (CGNA, 2023), demonstrando a importância deste aeroporto a nível nacional.

A gestão do Aeroporto da Pampulha, outrora de responsabilidade da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), foi transferida à concessionária CCR em maio de 2022, sendo previstos, por parte da CCR, a partir desta nova concessão, investimentos de mais de R\$150 milhões ao longo dos 30 anos subsequentes (CCR, 2022). Assim, ainda que o Aeroporto da Pampulha já consista atualmente em um polo de aviação regional, tem-se perspectivas de investimentos futuros e melhorias em termos de infraestrutura, o que pode eventualmente incorrer no aumento das atividades aeroportuárias.

Se, por um lado, o setor aeroportuário e, de forma análoga, o Aeroporto da Pampulha trazem consigo benefícios em termos de otimização de tempo, logísticos, dentre outros já mencionados inicialmente, por outro, ao se avaliar sob a ótica socioambiental, se fazem presentes preocupações relacionadas aos impactos oriundos das emissões atmosféricas geradas neste aeroporto, uma vez que esta tipologia de empreendimento possui potencial em causar impactos em termos de qualidade do ar na região do seu entorno.

O Aeroporto da Pampulha está inserido em região urbana, próximo a residências e áreas de lazer, como a Lagoa da Pampulha. Diante deste cenário, se fazem presentes preocupações relacionadas aos possíveis impactos relacionados às emissões de poluentes atmosféricos oriundas do referido empreendimento. O movimento Pampulha Viva, por exemplo, foi criado por vizinhos do Aeroporto da Pampulha com vistas à minimização dos impactos por eles percebidos no que tange às operações deste aeroporto, dentre os quais estão aqueles relacionados à poluição atmosférica.

Considerado o exposto, se faz necessária a realização de estudos para avaliar o potencial de contribuição das emissões atmosféricas relacionadas ao Aeroporto da Pampulha, de modo que se possa melhor compreender a dinâmica da dispersão dos poluentes atmosféricos emitidos neste Aeroporto e se estas emissões podem contribuir para uma eventual degradação da qualidade do ar, o que pode vir a implicar em impactos ambientais e prejuízos à saúde humana.

Neste sentido, o Estudo de Dispersão Atmosférica (EDA), de maneira especial, tem sido uma ferramenta demasiadamente utilizada por órgãos públicos e instituições privadas, uma vez que provê subsídios à gestão da qualidade do ar, permitindo simular, a partir, sobretudo, do diagnóstico das fontes de emissão de poluentes atmosféricos, a dinâmica da dispersão de poluentes de interesse sobre áreas e receptores de interesse.

Para simular a dinâmica da dispersão de poluentes utiliza-se de modelagem computacional, sendo que, dentre diversos softwares e modelos disponíveis, tem-se o AERMOD, que consiste em um modelo de dispersão atmosférica de pluma (isolinha de concentração) estacionária, com distribuições gaussianas, desenvolvido na década

de 1990 pela Sociedade Meteorológica dos Estados Unidos (do inglês, *American Meteorological Society*, AMS) em parceria com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês, *United States Environmental Protection Agency*, USEPA) (USEPA, 2023c).

Cabe destacar que o AERMOD possui uma versão com uma interface gráfica mais intuitiva, intitulada AERMOD View™, a qual incorpora perfeitamente o AERMOD e utiliza os mesmos mecanismos e premissas (MOKHTAR; HASSIM; TAIB, 2014; LAKES, 2022).

Diante do exposto, o presente trabalho se propõe a avaliar a dinâmica da dispersão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha sobre a qualidade do ar local, fazendo-se uso, para tanto, de modelagens por meio do AERMOD View™, além de também compor a proposta do presente trabalho a comparação dos resultados obtidos na modelagem frente aos padrões da Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018), Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 (MINAS GERAIS, 2023) e valores guia estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, do inglês, *World Health Organization*, WHO) por meio das Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS (do inglês, *WHO Global Air Quality Guidelines*), publicado em 2021 por esta Organização (OMS, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho consiste em avaliar o impacto da emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha sobre a qualidade do ar local, se valendo, para tanto, de modelagem computacional e de análise de conformidade dos resultados modelados frente a padrões de referência de qualidade do ar.

2.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho possui dois objetivos específicos, sendo eles:

- Objetivo Específico 1: Modelar a dispersão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha (CO, NO₂, SO₂, PTS, MP₁₀ e MP_{2,5}) sobre a região do entorno do empreendimento;
- Objetivo Específico 2: Avaliar a conformidade dos resultados modelados frente aos limites estabelecidos na Resolução CONAMA nº 491/2018, Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 e aos valores guia estabelecidos pela OMS nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar de 2021 desta Organização.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Panorama da Aviação

A aviação contribui diretamente para a geração de renda e movimentação financeira ao redor de todo o mundo. A nível global, segundo dados da Organização Internacional da Aviação Civil (do inglês, *International Civil Aviation Organization* - ICAO), o impacto econômico total da indústria da aviação em 2016 foi da ordem de 2,7 bilhões de dólares, cerca de 3,6% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial, sendo responsável pela criação de um total de 65,5 milhões de empregos em todo o mundo (ICAO, 2019). A nível nacional, dados da Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR) indicam que a aviação comercial brasileira e o seu impacto econômico no turismo contribuíram com cerca de 78 bilhões de reais para o Produto Interno Bruto (PIB) em 2022, o que correspondeu a 0,8% do PIB brasileiro (ABEAR, 2023), demonstrando a influência positiva deste setor no território nacional.

Ao se projetar o futuro da aviação, a ICAO espera um crescimento gradativo e plurianual do setor a nível global. Estimativas sugerem que a procura por transporte aéreo aumentará em média 4,3% ao ano até 2036, sendo que em 2030 há um potencial de que 200 mil voos por dia decolem e aterrizem em todo o mundo, fatos estes que, se confirmados, farão com que a indústria do transporte aéreo contribua globalmente em 2036 com um total de 97,8 milhões de empregos e 5,7 bilhões de dólares para o PIB mundial (ICAO, 2018).

Em termos de estruturas para suporte à aviação no Brasil, atualmente tem-se formalizado junto à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) um total de 500 aeródromos civis de uso público, que consistem em estruturas autorizadas a realizar exploração comercial do transporte aéreo de passageiros e/ou cargas, e 4.822 aeródromos civis de uso privado, que consistem em aeródromos abertos ao tráfego aéreo apenas para fins particulares mediante autorização de seu proprietário, perfazendo um total de 5.322 aeródromos civis (ANAC, 2023). Cabe mencionar que, conforme consta no artigo número 27 do Código Brasileiro de Aeronáutica, considera-se como aeroporto os aeródromos públicos, dotados de instalações e facilidades para apoio de operações de aeronaves e de embarque e desembarque de pessoas e cargas (BRASIL, 1986). Assim, o Aeroporto da Pampulha é caracterizado como

aeroporto justamente por consistir em um aeródromo de uso público e por possui os demais requisitos necessários para tal enquadramento.

Importante mencionar que o Aeroporto da Pampulha se encontra entre os 20 aeroportos com maior número de movimentações no Brasil, demonstrando sua importância no cenário nacional. Por meio da Tabela 1, que explicita informações compiladas dos Anuários Estatísticos de Tráfego Aéreo emitidos pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), especificamente por meio do seu Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), pode ser consultado o quantitativo total de movimentações (pousos e decolagens) realizadas entre os anos de 2015 e 2023 para os 20 aeródromos com maior número total de movimentações no ano de 2023, assim como também pode ser consultada a respectiva posição, em termos de número total de movimentações, de cada um destes aeroportos no *ranking* anual de movimentações.

Tabela 1 – Número total de movimentações (pousos e decolagens) por aeroporto e respectiva posição anual no ranking de movimentações

(continua)

Aeroporto	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Guarulhos (SBGR)	299.457 (1º)	272.141 (1º)	271.237 (1º)	299.961 (1º)	298.207 (1º)	159.652 (1º)	190.749 (1º)	245.163 (1º)	276.809 (1º)
Congonhas (SBSP)	221.534 (2º)	219.746 (2º)	223.989 (2º)	228.866 (2º)	222.784 (2º)	104.022 (2º)	127.211 (2º)	197.184 (2º)	232.374 (2º)
Brasília (SBBR)	199.246 (3º)	172.483 (3º)	158.507 (3º)	164.485 (3º)	154.331 (3º)	90.995 (3º)	112.886 (3º)	135.626 (3º)	148.776 (3º)
Campinas (SBKP)	131.537 (6º)	119.163 (6º)	112.772 (6º)	111.472 (6º)	117.458 (4º)	77.215 (4º)	105.513 (4º)	128.564 (4º)	126.113 (4º)
Santos Dumont (SBRJ)	139.561 (5º)	120.265 (5º)	118.149 (5º)	117.740 (4º)	114.825 (5º)	65.836 (6º)	74.884 (6º)	111.873 (5º)	123.234 (5º)
Confins (SBCF)	114.762 (7º)	100.231 (7º)	100.593 (7º)	102.134 (7º)	102.349 (7º)	49.322 (10º)	66.644 (8º)	91.218 (6º)	98.958 (6º)
Recife (SBRF)	75.973 (13º)	72.613 (11º)	79.169 (11º)	82.104 (12º)	84.490 (9º)	52.540 (8º)	75.107 (5º)	83.088 (7º)	87.363 (7º)
Jacarepaguá (SBJR)	91.352 (10º)	72.475 (12º)	76.386 (12º)	82.846 (11º)	86.253 (8º)	66.374 (5º)	62.973 (9º)	69.659 (9º)	81.517 (8º)
Salvador (SBSV)	106.321 (9º)	84.317 (9º)	81.700 (10º)	83.558 (10º)	79.684 (11º)	50.724 (9º)	68.287 (7º)	76.365 (8º)	77.657 (9º)
Porto Alegre (SBPA)	90.499 (11º)	82.242 (10º)	83.377 (8º)	85.963 (9º)	82.461 (10º)	41.513 (12º)	49.273 (12º)	66.440 (10º)	72.940 (10º)
Galeão (SBGL)	141.549 (4º)	131.168 (4º)	127.092 (4º)	116.717 (5º)	107.900 (6º)	44.243 (11º)	40.106 (14º)	51.091 (16º)	63.378 (11º)
Curitiba (SBCT)	79.084 (12º)	70.032 (13º)	71.638 (13º)	69.232 (14º)	70.416 (13º)	34.650 (17º)	34.920 (21º)	56.058 (13º)	60.566 (12º)

(conclusão)

Aeroporto	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Goiânia (SBGO)	71.520 (14º)	67.639 (14º)	66.247 (14º)	70.420 (13º)	59.201 (15º)	39.387 (13º)	50.053 (11º)	61.180 (11º)	59.388 (13º)
Campo de Marte (SBMT)	110.281 (8º)	84.509 (8º)	82.610 (9º)	87.044 (8º)	76.599 (12º)	56.844 (7º)	56.260 (10º)	57.610 (12º)	59.297 (14º)
Fortaleza (SBFZ)	66.151 (15º)	56.810 (15º)	56.747 (15º)	60.400 (15º)	60.800 (14º)	34.096 (18º)	41.378 (13º)	54.327 (14º)	53.230 (15º)
Belém (SBBE)	57.859 (17º)	44.994 (19º)	43.968 (19º)	43.321 (19º)	43.335 (18º)	35.282 (14º)	40.034 (16º)	51.483 (15º)	52.612 (16º)
Pampulha (SBBH)	53.523 (19º)	45.276 (18º)	45.218 (18º)	43.634 (18º)	43.115 (19º)	34.711 (16º)	36.100 (19º)	42.209 (20º)	50.450 (17º)
Cuiabá (SBCY)	-	-	-	-	-	-	37.223 (18º)	44.795 (17º)	46.792 (18º)
Florianópolis (SBFL)	55.789 (18º)	53.088 (16º)	50.082 (16º)	50.008 (16º)	46.358 (16º)	29.348 (19º)	32.531 (22º)	43.127 (19º)	46.241 (19º)
Aeroporto de Vitória (SBVT)	63.025 (16º)	50.959 (17º)	49.201 (17º)	46.950 (17º)	45.204 (17º)	28.557 (20º)	32.318 (23º)	40.128 (21º)	44.468 (20º)

Fonte: Adaptado de CGNA (2016), CGNA (2017), CGNA (2019), CGNA (2021), CGNA (2022), CGNA (2023).

Observa-se, desta forma, com base na Tabela 1, que entre 2015 e 2023 o Aeroporto da Pampulha apresentou um total de movimentações (pousos e decolagens) que variou de 34.711 em 2020 a 53.523 em 2015. Cabe ainda destacar que o número de movimentações no Aeroporto da Pampulha em 2015 (53.523) foi próximo ao quantitativo observado para o ano de 2023 (50.450). Além disso, ainda com base na Tabela 1, vale citar que em termos de posição no *ranking* de movimentações, o Aeroporto da Pampulha esteve entre os 20 aeroportos com maior número de movimentações entre 2015 e 2023, ocupando posições que variaram da 16ª posição (2020) à 20ª posição (2022).

3.2. Contexto do Licenciamento Ambiental do Aeroporto da Pampulha

O licenciamento ambiental consiste em um ato administrativo por meio do qual o órgão ambiental competente, que pode ser federal, estadual ou municipal, licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, de alguma forma, possam vir a degradar o meio ambiente, considerando as disposições legais e regulamentares, assim como as normas técnicas aplicáveis ao respectivo contexto (BRASIL, 1997).

A nível estadual, o Estado de Minas Gerais dispunha até 08/12/2017, quando foi então publicada a Deliberação Normativa (DN) COPAM nº 217 de 08 de dezembro de 2017 (MINAS GERAIS, 2017), da DN COPAM nº 74 de 9 de setembro de 2004 (MINAS GERAIS, 2004), sendo que esta antiga DN estabelecia critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental no nível estadual, além de dar outras providências.

A DN COPAM nº 74/2004 estabelecia que empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente seriam enquadradas em seis classes (1, 2, 3, 4, 5 e 6), sendo a classe 1 a de menor porte e potencial poluidor e a classe 6 de maior porte e potencial poluidor, conjugando de forma integrada duas variáveis para o estabelecimento da classe, sendo: **i)** o porte da atividade a ser licenciada, podendo variar entre pequeno (P), médio (M) ou grande (G), conforme os limites fixados nas listagens da própria DN COPAM nº 74/2004; e **ii)** o potencial poluidor ou degradador do meio ambiente, podendo ser pequeno (P), médio (M) ou grande (G) em função das características intrínsecas da atividade, conforme listagens da própria DN COPAM nº 74/2004, sendo o potencial poluidor considerado sobre as variáveis ambientais ar, água e solo.

Neste sentido, os aeroportos, que à luz da Listagem “A” da DN COPAM nº 74/2004 tinham como referência o código “E-01-09-0”, possuíam um potencial poluidor geral (integrando as variáveis ar, água e solo) que era máximo (G) e eram classificados segundo o seu porte em função do número de empregados, podendo ser pequeno (área total inferior a 10 ha e número de empregados inferior a 30), médio (demais portes não classificados nos critérios de pequeno ou grande) ou grande (área total superior a 30 ha ou número de empregados superior 80).

Considerando o exposto, o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), conforme processo administrativo de nº 05937/2009/001/2011 e decisão da Unidade Regional Colegiada Rio das Velhas, em reunião do dia 27/02/2012, concedeu Licença de Operação Corretiva (LOC) para o Aeroporto Carlos Drummond de Andrade (Aeroporto da Pampulha), à época sob gestão da INFRAERO, sendo de 4 anos a validade desta licença, ou seja, com vencimento em 27/02/2016. Para tanto, à época

da obtenção desta LOC, o empreendimento foi enquadrado como classe 6 à luz da DN COPAM nº 74/2004, ou seja, foi considerado que o mesmo possuía as máximas classificações de porte e potencial poluidor.

Cabe contextualizar que à época da emissão da LOC foram apresentados diversos estudos ambientais para embasar o levantamento de aspectos e impactos ambientais relacionados ao empreendimento. No que tange à disciplina de emissões atmosféricas, foi informado pela INFRAERO, por meio de relatório elaborado pela COSOMINAS Engenharia LTDA, que não existia à época do processo de licenciamento ponto de monitoramento de qualidade do ar em qualquer aeroporto brasileiro e, por isso, não foi possível saber, quando da formalização deste processo de licenciamento do Aeroporto da Pampulha, a real emissão gerada por este tipo de empreendimento ou qual a intensidade de poluentes atmosféricos que a população que frequenta, trabalha ou reside próximo ao aeroporto estaria exposta. Para suprir esta ausência de informações foi apresentado estudo realizado em outro aeroporto, o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Galeão), para embasar as análises acerca dos potenciais impactos das emissões atmosféricas associados ao Aeroporto da Pampulha (SIAM, 2011).

Já em 29/10/2015 foi formalizado o processo de Revalidação de Licença de Operação (REVLO) do Aeroporto da Pampulha, que foi posteriormente arquivado em função do advento da DN COPAM nº 217 de 08 de dezembro de 2017, deliberação normativa esta que, além de estabelecer critérios para classificação segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locacionais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais, também revogou a DN COPAM nº 74/2004. Este arquivamento foi baseado no artigo 36 da DN COPAM nº 217/2017, que prevê que “nos termos do art. 50 da Lei Estadual n. 14.184, de 31 de janeiro de 2002, ficam declarados extintos os processos de empreendimentos que em função desta Deliberação Normativa passem a ser dispensados de licenciamento ambiental, com seu consequente arquivamento”, sendo também previsto, por meio do parágrafo único do supracitado artigo 36, que “as extinções dos processos de licenciamento não desobrigam os empreendimentos de adotarem as medidas de

controle para mitigar os impactos advindos das atividades ou de obterem demais atos autorizativos legalmente exigidos” (MINAS GERAIS, 2017).

Já no ano de 2022, com a empresa CCR assumindo a responsabilidade pela gestão do Aeroporto da Pampulha, foi celebrado junto à Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade (SEINFRA) contrato específico, formalizando a concessão dos serviços públicos para a ampliação, manutenção e exploração da infraestrutura aeroportuária do Aeroporto da Pampulha, sendo transferido à CCR o direito de uso, gozo e a fruição dos bens públicos necessários à prestação dos serviços de forma adequada.

Como estratégia da CCR para melhorias dos serviços no Aeroporto da Pampulha, a concessionária tem planejada a realização de obras com caráter de adequação das infraestruturas existentes, tais como implantação de novas *taxiways*, assim como a implantação de novas estruturas voltadas à exploração comercial, como a construção de novo complexo comercial, motivo pelo qual solicitou ao órgão ambiental estadual competente a manifestação quanto ao tipo de licenciamento ambiental aplicável às características destas obras, bem como os estudos ambientais, planos e programas que serão exigidos para a emissão das licenças ambientais necessárias. Como resposta, foi informado pelo órgão ambiental que a modalidade de Licenciamento Ambiental Simplificado/Relatório Ambiental Simplificado (LAS/RAS) seria a mais adequada, sendo que esta modalidade de licenciamento consiste na análise, em uma única fase, do Relatório Ambiental Simplificado (RAS), com expedição da Licença Ambiental Simplificada (LAS), denominada LAS/RAS, não sendo requeridos, para tanto, a apresentação de estudos de dispersão atmosférica visando à melhor compreensão da dinâmica da dispersão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha.

Por fim, cabe apenas complementar que, atualmente, para atividades e empreendimentos localizados em Minas Gerais em se tem a obrigatoriedade legal de elaboração e apresentação de Estudo de Dispersão Atmosférica, este estudo não precisa incorporar fontes que não pertençam ao empreendimento a ser licenciado, o que pode fazer com que as concentrações de poluentes previstas nestes estudos não correspondam ao que, de fato, será constatado nos receptores adjacentes ao

empreendimento, uma vez que tais receptores estarão sujeitos à influência não somente das fontes associadas ao empreendimento sob licenciamento, mas também de contribuições de outras fontes externas.

3.3. Emissões Atmosféricas Provenientes de Aeroportos

As emissões atmosféricas consistem em um aspecto ambiental que deve ser observado nas operações de um empreendimento, sobretudo considerando o seu potencial em causar impactos adversos sobre a qualidade do ar e a saúde humana. Em função do exposto, a poluição atmosférica foi reconhecida como fator de risco no que se refere à ocorrência de doenças não transmissíveis, como isquemia cardíaca, acidente vascular cerebral, doença pulmonar obstrutiva crônica, asma e cancro (OMS, 2021).

Neste contexto, Koulidis, Progiou e Ziomas (2020) destacam que o setor aeroportuário pode, de fato, contribuir consideravelmente para a poluição do ar, ao passo que Arter *et al.* (2022) afirmam que as emissões da aviação relacionadas às operações de pouso e decolagem podem degradar a qualidade do ar local e regional, levando a cenários adversos à saúde, sobretudo em populações inseridas nas proximidades de aeroportos. Corroborando o exposto, a própria Organização da Aviação Civil Internacional (do inglês *International Civil Aviation Organization* – ICAO) reconhece que as fontes de emissões relacionadas aos aeroportos têm a capacidade de emitir poluentes que podem contribuir para a degradação da qualidade do ar nas comunidades vizinhas (ICAO, 2018).

Além disso, sob o ponto de vista econômico, Miraglia e Gouveia (2014) avaliaram o impacto financeiro de eventos de saúde atrelados à poluição do ar em 29 regiões metropolitanas brasileiras. A partir da estimativa de mortalidade atribuível às concentrações de material particulado (MP) nestas regiões, bem como levando em conta o respectivo quantitativo de óbitos registrados, foram calculados os custos associados a essa mortalidade, em que se concluiu que o custo anual das mortes prematuras no Brasil foi da ordem de US\$ 1,7 bilhão.

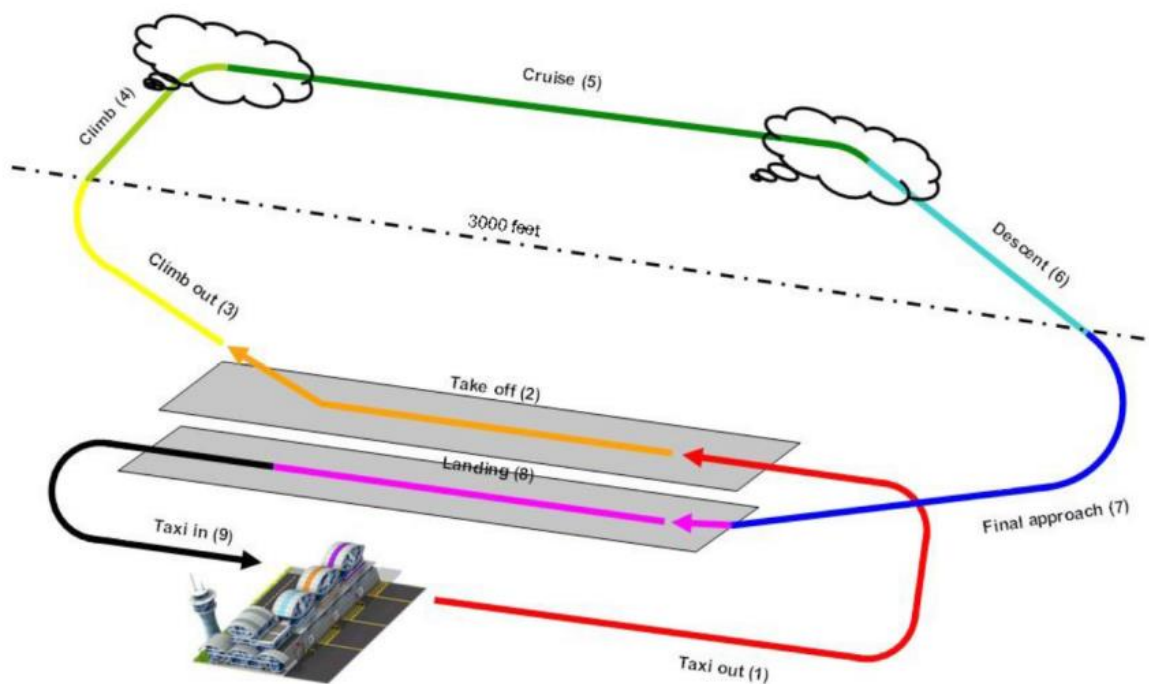
Ao se avaliar a perspectiva operacional, grande parte dos poluentes atmosféricos emitidos em aeroportos decorre das operações das aeronaves, as quais podem ser

consideradas como uma fonte atípica, cujos escapamentos têm impulso horizontal e flutuabilidade, com variações ao longo do tempo (PANDEY; VENKATRAM; ARUNACHALAM, 2024). Quanto às tipologias de operações das aeronaves, de maneira geral, estas podem ser divididas em dois macro grupos, sendo eles: **i)** operações associadas ao ciclo de pouso e decolagem (do inglês, *landing and take-off cycle* – LTO), que inclui todas as atividades próximas ao aeroporto que ocorrem abaixo da altitude de 3.000 pés (aproximadamente 915 metros) e representa, portanto, as emissões de poluentes nas proximidades dos aeroportos; e **ii)** operações associadas ao ciclo de cruzeiro, que é definido como todas as atividades que ocorrem em altitudes acima de 3.000 pés (aproximadamente 915 metros) (EEA, 2006).

As emissões atmosféricas provenientes do ciclo LTO merecem destaque, pois podem vir a afetar a qualidade do ar a nível local, na área onde são aplicáveis os padrões de qualidade, ao passo que as emissões provenientes do ciclo de cruzeiro, que possui altura similar à da Camada Limite Planetária (CLP), são passíveis de serem transportadas pela circulação atmosférica global, promovendo efeitos em escalas regionais e globais (FEAM, 2018).

Por meio da Figura 1 apresenta-se um resumo gráfico acerca das principais etapas abrangidas tanto pelo ciclo LTO quanto pelo ciclo de cruzeiro.

Figura 1 – Ciclos de vôo padrão em um aeroporto



Fonte: ANAC (2013).

Conforme apresentado, o ciclo LTO é composto por: **i) Taxi out**, que corresponde ao movimento da aeronave até à posição para decolagem; **ii) Take off**, que abrange o descolamento e subida até aproximadamente 500 metros de altitude; **iii) Climb out**, que consiste na subida até a altura aproximada de 915 metros; **iv) Final approach e landing**, que correspondem à aproximação (abaixo dos 1.000 metros) e à aterrisagem; **v) Taxi in**: deslocamento da aeronave no solo até ao ponto de embarque e desembarque de passageiros.

Considerando a proximidade de aeroportos urbanos localizados perto de áreas metropolitanas densamente povoadas, seus ciclos LTO têm o potencial de impactar substancialmente o meio ambiente e a saúde das pessoas que vivem no entorno (MASIOL; HARRISON, 2014). Corroborando o exposto, estudos elaborados por Hudda *et al.* (2020), Shirmohammadi *et al.* (2018), Masiol e Harrison (2014), Hsu *et al.* (2013), Dodson *et al.* (2009) e Schürmann *et al.* (2007) evidenciaram que, de fato, estas atividades contribuem consideravelmente para a poluição atmosférica e diminuem a qualidade do ar, não apenas no aeroporto, mas também nas comunidades próximas. Ademais, Vujović e Todorović (2017) examinaram vários poluentes emitidos pelo tráfego aéreo no Aeroporto Nikola Tesla, em Belgrado, utilizando estatísticas do

ciclo LTO de 2008 a 2015 e constataram que a poluição atmosférica local aumentou a medida em que o número de ciclos LTO se elevou.

Neste sentido, dentre as potenciais emissões associadas às operações de aeronaves, importante destacar que os seus motores produzem e emitem, dentre outros compostos, os óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), bem como materiais particulados (USEPA, 2005), sendo estes poluentes emitidos ao longo do ciclo LTO.

Além disso, ao se considerar que, além de aeronaves, as operações aeroportuárias demandam a utilização de veículos automotores terrestres para apoio terrestre, observa-se, portanto, que também há potencial de emissões atmosféricas de origem veicular, incorrendo em emissões de, dentre outros poluentes, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e materiais particulados (MP) (AGUILAR-GÓMEZ *et al.*, 2009; CETESB, 2016).

O monóxido de carbono (CO) consiste em um gás tóxico incolor, não irritante, inodoro e insípido, sendo produzido pela combustão incompleta de combustíveis carbonáceos, como madeira, gasolina, carvão, gás natural e querosene, implicando em dificuldades no transporte de oxigênio no corpo humano por associar-se com a hemoglobina (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Os óxidos de nitrogênio podem ser emitidos na atmosfera a partir de processos de combustão, sendo que uma fração em específico destes óxidos, o dióxido de nitrogênio (NO_2), é de interesse público, uma vez que possui potencial de impactar negativamente a saúde, provocando, por exemplo, irritação no sistema respiratório (SEINFELD; PANDIS, 2016).

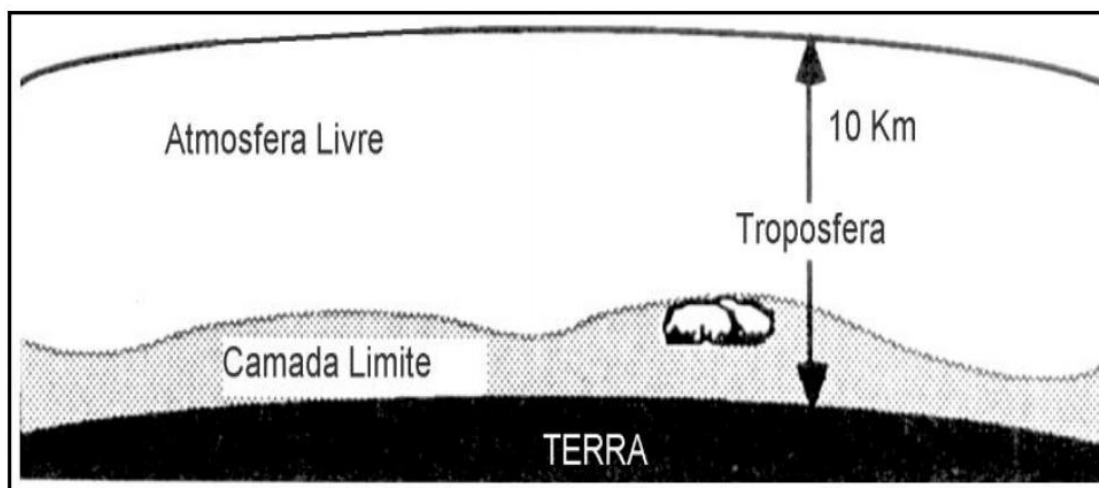
Em relação aos óxidos de enxofre, em especial ao dióxido de enxofre (SO_2), este consiste em um gás incolor, resultante, sobretudo, da queima de combustíveis que contêm enxofre, tais como óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina, sendo agressivo ao trato respiratório e sendo precursor da chuva ácida, podendo ainda, em reação com outros compostos presentes na atmosfera, se transformar em material particulado na forma de sulfato (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Em relação aos materiais particulados, importante aludir inicialmente às partículas totais em suspensão (PTS), as quais consistem em partículas com diâmetro inferior a 50 μm , podendo indicar certo grau de sujeira presente em áreas específicas. Incluídos na fração das partículas totais em suspensão estão os materiais particulados com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm (MP_{10}) e os materiais particulados com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$), caracterizados por serem partículas respiráveis e inaláveis, respectivamente, tendo ambos o potencial de conferir prejuízos ao sistema respiratório humano e, por conseguinte, à saúde humana (SEINFELD; PANDIS, 2016).

3.4. Dispersão Atmosférica

No contexto da poluição atmosférica, a dispersão atmosférica refere-se à maneira como os poluentes liberados se espalham e se diluem na atmosfera (PINHEIRO; VENTURI; GALVANI, 2022). Neste sentido, importante fazer menção à Camada Limite Planetária (CLP, do inglês *Planetary Boundary Layer* – PBL), também conhecida como Camada Limite Atmosférica (CLA, do inglês *Atmospheric Boundary Layer* – ABL), que consiste na região mais baixa da atmosfera (Figura 2), podendo apresentar valores, em termos de altura em relação ao solo, que podem variar de dezenas de metros a mais de 1 quilômetro. A CLP representa a área onde ocorrem a maioria das interações entre a superfície terrestre e a atmosfera, abrangendo a maior parcela dos fenômenos de poluição do ar (GARRATT, 1994; SEIBERT *et al.*, 1998; MOREIRA; TIRABASSI; MORAES, 2008).

Figura 2 – Representação gráfica da troposfera e da Camada Limite Planetária (CLP)



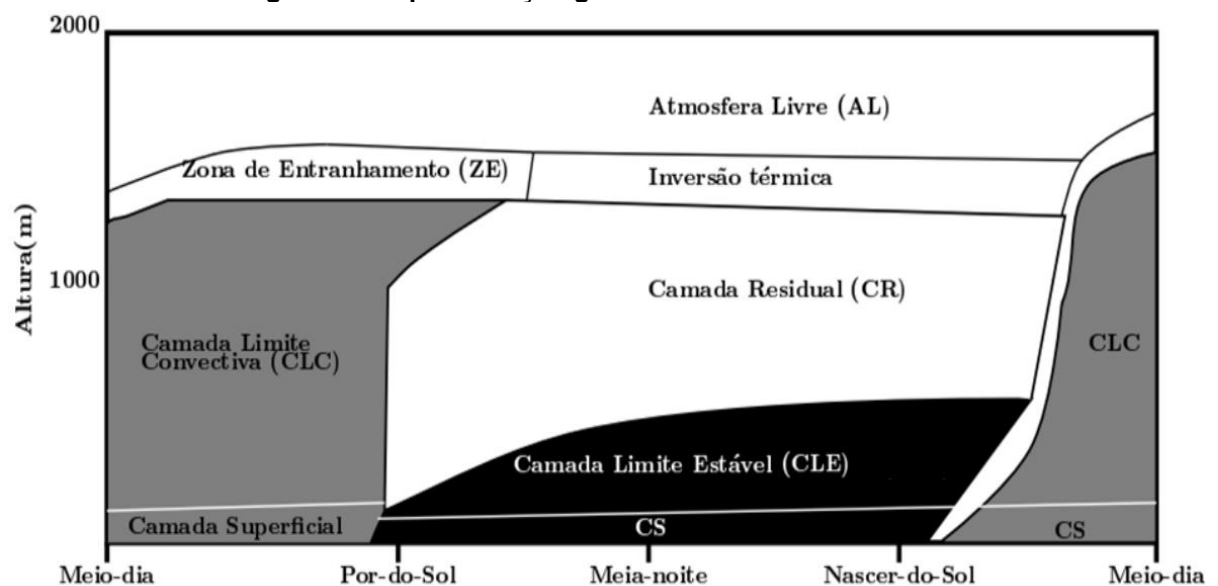
Fonte: Stull (1988).

Assim, a estrutura e os fenômenos associados à CLP são de fundamental importância para diversas aplicações relacionadas a questões sociais, econômicas, ambientais e de saúde, incluindo avaliações da qualidade do ar (HAN *et al.*, 2009; SUJATHA *et al.*, 2016; STIRNBERG *et al.*, 2021).

A CLP apresenta resposta direta a forçantes superficiais em escalas de tempo inferiores a 1 hora (GARRATT, 1994), sendo estas forçantes caracterizadas por serem influências que afetam o comportamento e a dinâmica da CLP, tais como gradientes de temperatura e umidade, radiação solar, ventos, bem como efeitos da topografia. Tem ainda como característica a grande variação espacial e temporal, em função, principalmente, de variações na superfície terrestre, do período do ano, da cobertura vegetal, da radiação solar e de outros fatores associados a cada região.

Em função da estabilidade atmosférica que, por sua vez, está associada diretamente ao ciclo diurno de energia, aquecimento e resfriamento da superfície, diferentes subcamadas podem ocorrer dentro da CLP, tais como as apresentadas na Figura 3, em que se destacam a Camada Limite Convectiva (CLC, do inglês *Convective Boundary Layer* – CBL), a Camada Residual (CR, do inglês *Residual Layer* – RL) e a Camada Limite Estável (CLE, do inglês *Stable Boundary Layer* – SBL).

Figura 3 – Representação geral do ciclo da camada limite



Fonte: Adaptado de Stull (1988).

Se os processos impulsionados pela superfície dominarem os mecanismos de fluxo sinótico, de larga escala, em um dia quente e com ausência de nuvens, a Camada Limite Planetária tende a se apresentar como uma Camada Limite Convectiva, cuja formação ocorre pela manhã em resposta ao aquecimento solar do solo, resultando em fluxos de calor turbulentos. Assim, a altura da CLC aumenta ao longo do período da manhã, atingindo o seu pico no início da tarde, quando se propaga por toda a CLP e a altura da Camada Limite Planetária se iguala à altura da Camada Limite Convectiva. Próximo ao pôr do sol, a redução da radiação e o resfriamento da superfície terrestre resultam no crescimento de uma nova camada próxima ao solo, a Camada Limite Estável, sendo que a Camada Limite Convectiva se rompe e se desacopla da superfície, se convertendo na Camada Residual, a qual se encontra localizada acima do topo da Camada Limite Estável. Neste caso, a altura da Camada Residual coincide com a altura da Camada Limite Planetária. No dia seguinte, a Camada Residual é arrastada para a Camada Limite Convectiva recém-formada durante o crescimento matinal, dando continuidade ao ciclo (KOTTHAUS *et al.*, 2023).

Cabe ainda destacar que podem ocorrer variações horizontais na dinâmica da CLP, sendo estas variações resultantes da combinação de condições atmosféricas sinóticas, tais como estabilidade atmosférica, cisalhamento do vento, dinâmica de nuvens, além de forçantes de superfície associadas a variações na cobertura da superfície, rugosidade e topografia (GARRATT, 1994; SEIBERT *et al.*, 2000).

No contexto da qualidade do ar cabe ainda fazer menção ao albedo, à razão de *Bowen* (do inglês, *Bowen ratio*) e à rugosidade da superfície (do inglês, *surface roughness*), que consistem em parâmetros importantes para a condução de modelagens de dispersão atmosférica. O albedo consiste na fração da radiação solar incidente que é refletida pela superfície de volta ao espaço, sem absorção, sendo usado para estimar a intensidade da turbulência convectiva que ocorre durante condições instáveis, determinando quanto da radiação incidente é convertida em fluxo de calor sensível. A rugosidade da superfície influencia diretamente o cisalhamento da superfície e é um fator fundamental na determinação da magnitude da turbulência mecânica e da estabilidade da camada limite, sendo que o comprimento da rugosidade da superfície, que está relacionado com as características de rugosidade da superfície, é entendido no AERMOD como a altura na qual a velocidade horizontal média do vento se

aproxima de zero e está relacionado com as características de rugosidade do terreno. Já a razão de *Bowen* consiste na razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente, sendo usado para determinar os parâmetros da camada limite planetária para condições de convecção durante condições instáveis (USEPA, 2023a).

Cabe ainda mencionar que na atmosfera podem se fazer presentes os fenômenos de deposição seca e úmida, que podem influenciar na dinâmica da dispersão de poluentes. As partículas mais grossas podem vir a ser removidas na atmosfera por meio da deposição seca, que se faz presente em função da ação da gravidade, de modo que devido à massa e à velocidade de queda da partícula, esta deposição pode vir a ocorrer em local próximo às fontes de emissão. Já as partículas mais finas, que são removidas, sobretudo, por meio da precipitação pluviométrica (deposição úmida), dispõem de maior tempo de residência na atmosfera e, desta forma, podem ser depositadas em locais distantes da fonte de emissão (BERINGUI *et al.*, 2021; AL-THANI; KOÇ; ISAFAN, 2018; GRANTZ, 2003; PÖSCHL, 2005).

3.5. Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar consistem em um dos instrumentos de gestão que integram a Política Nacional de Qualidade do Ar, sendo expressos em concentração de um determinado poluente na atmosfera e estando associados a um dado intervalo de tempo de exposição, de modo a dar subsídios para que a saúde da população e o meio ambiente sejam preservados no que tange aos potenciais danos causados pela poluição atmosférica (BRASIL, 2024; BRASIL, 2018).

Neste sentido, foi publicada em 19 de novembro de 2018 a Resolução CONAMA nº 491/2018, que dispõe sobre padrões de qualidade do ar no âmbito federal. Por meio desta Resolução são definidos valores de referência de curto prazo (1 hora, 8 horas ou 24 horas) e longo prazo (anual), conforme aplicável a cada poluente atmosférico. São ainda estabelecidos padrões intermediários de qualidade do ar (PI) por poluente, os quais são definidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas, assim como padrões finais de qualidade do ar (PF), que consistem em valores guia definidos pela OMS em 2005. Os padrões estabelecidos por meio da Resolução CONAMA nº 491/2018 para os poluentes CO, NO₂, SO₂, PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} são apresentados por meio da Tabela 2 (BRASIL, 2018).

Tabela 2 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 (evidenciados apenas os limites dos poluentes com interface com o presente estudo)

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 ⁵	PI-2 ⁶	PI-3 ⁷	PF ⁸	
		µg.m ⁻³	µg.m ⁻³	µg.m ⁻³	µg.m ⁻³	ppm
Monóxido de Carbono – CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Dióxido de Nitrogênio – NO₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Dióxido de Enxofre – SO₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Material Particulado – MP₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado – MP_{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-

¹Média aritmética anual. / ²Média horária. / ³Máxima média móvel obtida no dia. / ⁴Média geométrica anual. / ⁵Padrão intermediário 1. / ⁶Padrão intermediário 2. / ⁷Padrão intermediário 3. / ⁸Padrão final.

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 491/2018.

A nível estadual, no que se refere ao Estado de Minas Gerais, foi publicada em 23 de novembro de 2023 a Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023, que dispõe sobre padrões de qualidade do ar para o Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Por meio desta DN, de forma análoga à Resolução CONAMA nº 491/2018, são definidos valores de referência de curto prazo (1 hora, 8 horas ou 24 horas) e longo prazo (anual), conforme aplicável a cada poluente atmosférico, sendo também previstos padrões intermediários de qualidade do ar (PI) e padrões finais (PF) por poluente. Os padrões estabelecidos por meio da DN COPAM nº 248/2023 para os poluentes CO, NO₂, SO₂, PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} são apresentados por meio da Tabela 3 (MINAS GERAIS, 2023).

Tabela 3 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela DN COPAM nº 248/2023 (evidenciados apenas os limites dos poluentes com interface com o presente estudo)

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 ⁵	PI-2 ⁶	PI-3 ⁷	PF ⁸	
		µg.m ⁻³	µg.m ⁻³	µg.m ⁻³	µg.m ⁻³	ppm
Monóxido de Carbono – CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
	1 hora ^{2,9}	260	240	220	200	-
Dióxido de Nitrogênio – NO₂	Anual ¹	60	50	45	40	-
	24 horas	125	50	30	20	-
Dióxido de Enxofre – SO₂	Anual ¹	40	30	20	-	-
	24 horas	-	-	-	240	-
Partículas Totais em Suspensão – PTS	Anual ⁴	-	-	-	80	-
	24 horas	120	100	75	50	-
Material Particulado – MP₁₀	Anual ¹	40	35	30	20	-
	24 horas	60	50	37	25	-
Material Particulado – MP_{2,5}	Anual ¹	20	17	15	10	-

¹Média aritmética anual. / ²Média horária. / ³Máxima média móvel obtida no dia. / ⁴Média geométrica anual. / ⁵Padrão intermediário 1. / ⁶Padrão intermediário 2. / ⁷Padrão intermediário 3. / ⁸Padrão final. / ⁹Na versão da DN COPAM nº 248/2023 publicada em 08/12/2023, consta como período de referência de curto prazo para NO₂ o período de 24 horas, porém, após consulta junto ao órgão ambiental de Minas Gerais, foi informado que este período está em revisão e será atualizado para 1 hora, de modo a ficar igual ao período de referência da Resolução CONAMA nº 491/2018, motivo pelo qual na Tabela 3 foi considerado o período de 1 hora.

Fonte: Adaptado da Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023.

Cabe ainda mencionar que a Organização Mundial da Saúde publicou em 2021 um documento intitulado Diretrizes Globais de Qualidade do Ar, por meio do qual estabelece os valores de referência (valores-guia) para determinados poluentes, considerando curto prazo e longo prazo, conforme aplicável a diversos poluentes atmosféricos. Destaca-se que estes valores estabelecidos pela OMS consistem em diretrizes, não obrigatórias, que visam à proteção da saúde pública e à promoção de um ambiente sustentável. Neste contexto, são estabelecidos pela OMS padrões de qualidade do ar interinos (PI) por poluente, os quais são definidos como valores-guia temporários a serem cumpridos em etapas, assim como o nível guia de qualidade do ar final (do inglês, *Air Quality Guideline Level – AQG Level*).

Os valores-guia estabelecidos pela OMS nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar para CO, NO₂, SO₂, PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} são apresentados por meio da Tabela 4, sendo válido destacar que a OMS não estabelece valores-guia para o parâmetro PTS.

Tabela 4 – Limites de referência estabelecidos na Tabela 0.1 das Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS

Poluente Atmosférico	Período de Referência	Padrão Interino				AQG Level ¹
		1	2	3	4	
Monóxido de Carbono – CO (mg.m ⁻³)	24 horas	7	-	-	-	4
Dióxido de Nitrogênio – NO ₂ (µg.m ⁻³)	24 horas	120	50	-	-	25
	Anual	40	30	20	-	10
Dióxido de Enxofre – SO ₂ (µg.m ⁻³)	24 horas	125	50	-	-	40
Partículas Totais em Suspensão – PTS (µg.m ⁻³)	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Material Particulado – MP ₁₀ (µg.m ⁻³)	24 horas	150	100	75	50	45
	Anual	70	50	30	20	15
Material Particulado – MP _{2,5} (µg.m ⁻³)	24 horas	75	50	37,5	25	15
	Anual	35	25	15	10	5

¹Nível Guia de Qualidade do Ar, do inglês *Air Quality Guideline Level*.

Fonte: Adaptado de OMS (2021).

3.6. Modelagem da Dispersão Atmosférica

Os modelos meteorológicos consistem em soluções computacionais que viabilizam a reconstrução da evolução espaço-temporal da variável que descreve o fluido atmosférico, podendo ser utilizados de forma isolada, para validar condições meteorológicas pretéritas ou futuras, ou como pré-processadores de modelos de dispersão atmosférica. Neste sentido, os modelos meteorológicos podem ser definidos quanto à sua escala espacial de aplicação em três tipologias, sendo modelos de escala global, modelos de mesoescala e modelos de escala regional e local. Os modelos de escala global apresentam como domínio de cálculo todo o planeta, reconstruindo a circulação de grande escala. Os modelos de mesoescala têm como área de abrangência uma escala espacial de 100 quilômetros à ordem de milhar de quilômetros. Já os modelos de escala regional e local têm como escala espacial a ordem de dezenas a centenas de quilômetros, permitindo reconstruir a influência local do fluxo atmosférico (MOREIRA; TIRABASSI; MORAES, 2008).

Os modelos de qualidade do ar, os quais podem incorporar os modelos meteorológicos, permitem prover suporte na previsão de efeitos associados à emissão de poluentes atmosféricos, consistindo em uma descrição matemática dos mecanismos de transporte e difusão dos poluentes na atmosfera. Estes são

embasados na solução de equações fundamentais de transporte, as quais não apresentam solução analítica, de modo que se fazem necessários métodos numéricos apropriados às condições apresentadas para obtenção de uma solução (MELO, 2011). Os modelos de dispersão atmosférica podem possuir distintas classificações, em que se destacam os eulerianos, os lagrangianos e os gaussianos.

Os modelos eulerianos têm como ideia principal a resolução numérica da equação de transporte atmosférico em um referencial de coordenadas fixas, consistindo, matematicamente, em uma equação diferencial parcial de segunda ordem, em que sua solução com as condições iniciais e de contorno apropriadas fornece a evolução espaço-temporal da concentração (LEELÓSSY *et al.*, 2014).

Os modelos lagrangianos calculam trajetórias de poluentes atmosféricos impulsionados por efeitos determinísticos (campo de vento e flutuabilidade) e estocásticos (turbulência), estando inseridos nesta tipologia de modelo aqueles que acompanham a pluma (isolinha de concentração) de poluentes como segmento “*puff*”, tal como o *California Puff Model* (CALPUFF), tratando a poluição como uma superposição de diversas nuvens (“*puff's*”) com determinado volume, calculando as trajetórias desses “*puff's*” (LEELÓSSY *et al.*, 2014).

Por fim, os modelos gaussianos se baseiam em uma distribuição gaussiana da pluma nas direções vertical e horizontal, sob condições de estado estacionário. Embora apresentem limitações, uma vez que consideram aproximações de estado estacionário, não levando em consideração o tempo necessário para o poluente viajar até o receptor, ainda assim, em função de seus diversos benefícios, dentre os quais o tempo de resposta, são amplamente utilizados na modelagem da dispersão atmosférica, em particular para fins regulatórios (HOLMES; MORAWSKA, 2006; LEELÓSSY *et al.*, 2014).

Neste sentido, dentre os modelos gaussianos, importante destacar o AERMOD, que consiste em um modelo regulatório da Sociedade Meteorológica Americana e da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês, *American Meteorological Society and U.S. Environmental Protection Agency Regulatory*), capaz de viabilizar a modelagem da dispersão da poluição atmosférica (PERRY *et al.*, 2005).

Este modelo, de plumas (isolinhas de concentração) em estado estacionário, é aplicável a áreas rurais e urbanas, terrenos planos e complexos, descargas superficiais e elevadas, assim como fontes múltiplas, incluindo fontes pontuais, de área e de volume. Vale também mencionar que o AERMOD calcula a dispersão atmosférica com base na estrutura de turbulência da Camada Limite Planetária (CLP) e em alguns conceitos de escala, podendo levar em consideração fontes de superfície e elevadas (TARTAKOVSKY; BRODAY; STERN, 2013). Importante ainda destacar que o AERMOD constrói perfis verticais das variáveis meteorológicas necessárias com base em medições e extrapolações dessas medições a partir de relações de similaridade, de modo que perfis verticais de velocidade do vento, direção do vento, turbulência, temperatura e gradiente de temperatura são estimados usando as observações meteorológicas disponíveis (USEPA, 2023b).

O AERMOD é projetado para funcionar com um conjunto mínimo de parâmetros meteorológicos observados, requerendo medição de superfície de velocidade do vento, direção do vento, temperatura ambiente e cobertura de nuvens. Cabe ainda destacar que se faz necessário obter dados oriundos de lançamento de radiossondagem para calcular a altura de mistura convectiva da atmosfera ao longo do dia. Além disso, importante mencionar que características da superfície, tais como albedo, rugosidade da superfície e razão de *Bowen*, também são necessárias para viabilizar a construção de perfis de similaridade dos parâmetros relevantes da camada limite planetária (USEPA, 2023b).

As características da superfície, representadas pelo albedo, rugosidade da superfície e razão de *Bowen* são, de forma conjunta com os dados meteorológicos (velocidade do vento, direção do vento, temperatura e cobertura de nuvens), inseridas no AERMET, que consiste no pré-processador meteorológico do AERMOD. Posteriormente, o AERMET calcula os parâmetros da camada limite planetária, dentre os quais tem-se a velocidade de fricção, o comprimento de *Monin-Obukhov*, a escala de velocidade convectiva, a escala de temperatura, altura de mistura e o fluxo de calor superficial. Destaca-se que o comprimento de *Monin-Obukhov* compreende a relação entre o fluxo turbulento de origem mecânica e convectiva, sendo utilizado para avaliar o grau de estabilidade atmosférica (MOREIRA; TIRABASSI; MORAES, 2008).

Cabe mencionar ainda que por meio do AERMAP, pré-processador de terreno do AERMOD e que utiliza dados de Modelo Digital de Elevação, viabiliza-se o cálculo de uma altura representativa de influência do terreno a partir dos dados de terreno em grade, conhecida como escala de altura do terreno, que é definida de forma única para cada ponto receptor (USEPA, 2023b).

Na camada limite estável (CLE) o AERMOD assume que a distribuição da concentração é gaussiana tanto na vertical quanto na horizontal, sendo que a equação utilizada para calcular a concentração (C_S) em um dado ponto considerando a CLE é a que segue abaixo (Equação 1) (USEPA, 2023b).

$$C_S(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\tilde{u}\sigma_{z_s}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z - h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{z_s}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{z_s}^2}\right) \right] \quad (1)$$

Em que:

- $C_S(x_r, y_r, z_r)$ é a concentração total na camada limite estável;
- Q é a taxa de emissão da fonte;
- \tilde{u} é a velocidade efetiva do vento;
- σ_{z_s} é a dispersão vertical total na camada limite estável;
- F_y a função de distribuição lateral com meandro;
- h_{es} é a altura da pluma;
- z é assumido como z_r (altura do receptor acima da base da fonte local) para o estado de pluma horizontal e como z_p (altura de um receptor acima do terreno local) para o estado de acompanhamento do terreno;
- z_{ieff} é a altura da superfície refletora na camada limite estável.

Na camada limite convectiva o AERMOD assume que a distribuição na horizontal é gaussiana, ao passo que a distribuição vertical é considerada como uma função de densidade de probabilidade bi-gaussiana e que resulta de uma combinação de três tipos de plumas, sendo elas a direta, a indireta e a penetrada. A direta considera o material da pluma dentro da camada de mistura que inicialmente não interage com o topo da camada de mistura, ou seja, contempla a fonte direta ou real no perfil. Já a indireta contempla o material da pluma localizada acima do topo da camada limite

convectiva para explicar a lenta dispersão descendente de plumas flutuantes que se elevam ou permanecem próximas, mas abaixo da altura da camada de mistura, na CLC. Por fim, a penetrada abrange o material da pluma que é liberado na camada de mistura, mas, devido à sua flutuabilidade, penetra na camada acima da camada limite convectiva. Neste sentido, para calcular as concentrações (C_c) em condições associadas à camada limite convectiva o AERMOD utiliza a equação abaixo (Equação 2) (USEPA, 2023b).

$$C_c(x_r, y_r, z_r) = C_d(x_r, y_r, z_r) + C_r(x_r, y_r, z_r) + C_p(x_r, y_r, z_r) \quad (2)$$

Em que:

- $C_c(x_r, y_r, z_r)$ é a concentração total na camada limite convectiva;
- $C_d(x_r, y_r, z_r)$ é a contribuição da concentração da fonte direta;
- $C_r(x_r, y_r, z_r)$ é a contribuição da concentração da fonte indireta;
- $C_p(x_r, y_r, z_r)$ é a contribuição da concentração da fonte penetrada.

Neste sentido, tem-se que a contribuição da fonte direta ($C_d(x_r, y_r, z_r)$) é dada pela equação abaixo (Equação 3).

$$C_d(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q f_p}{\sqrt{2\pi\tilde{u}}} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z - \Psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + \Psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (3)$$

Em que:

- $C_d(x_r, y_r, z_r)$ é a contribuição da concentração da fonte direta;
- Q é a taxa de emissão da fonte;
- f_p é a fração da massa da pluma presa na camada limite convectiva ($0 < f_p < 1$);
- \tilde{u} é a velocidade efetiva do vento;
- F_y a função de distribuição lateral com meandro;
- j é igual a 1 para correntes ascendentes e 2 para correntes descendentes;
- λ_j é o coeficiente de ponderação para corrente ascendente ($j = 1$) e corrente descendente ($j = 2$);

- σ_{zj} é a dispersão vertical total para corrente ascendente ($j = 1$) e corrente descendente ($j = 2$);
- z é assumido como z_r (altura do receptor acima da base da fonte local) para o estado de pluma horizontal e como z_p (altura de um receptor acima do terreno local) para o estado de acompanhamento do terreno;
- z_i é a altura da camada de mistura na camada limite convectiva;
- Ψ_{dj} é a altura efetiva da pluma.

Já a contribuição da fonte indireta ($C_r(x_r, y_r, z_r)$) é descrita pela equação abaixo (Equação 4).

$$C_r(x_r, y_r, z_r) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi}\tilde{u}} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z + \Psi_{rj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - \Psi_{rj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (4)$$

Em que:

- $C_r(x_r, y_r, z_r)$ é a contribuição da concentração da fonte indireta;
- Q é a taxa de emissão da fonte;
- f_p é a fração da massa da pluma presa na camada limite convectiva ($0 < f_p < 1$);
- \tilde{u} é a velocidade efetiva do vento;
- F_y a função de distribuição lateral com meandro;
- j é igual a 1 para correntes ascendentes e 2 para correntes descendentes;
- λ_j é o coeficiente de ponderação para corrente ascendente ($j = 1$) e corrente descendente ($j = 2$);
- σ_{zj} é a dispersão vertical total para corrente ascendente ($j = 1$) e corrente descendente ($j = 2$);
- z é assumido como z_r (altura do receptor acima da base da fonte local) para o estado de pluma horizontal e como z_p (altura de um receptor acima do terreno local) para o estado de acompanhamento do terreno;
- Ψ_{rj} é a altura efetiva da pluma;
- z_i é a altura da camada de mistura na camada limite convectiva.

A contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva ($C_p(x_r, y_r, z_r)$) é apresentada por meio da equação abaixo (Equação 5).

$$C_p(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi}\tilde{u}\sigma_{zp}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z - h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right] \quad (5)$$

Em que:

- $C_p(x_r, y_r, z_r)$ é a contribuição da concentração da fonte penetrada;
- Q é a taxa de emissão da fonte;
- f_p é a fração da massa da pluma presa na camada limite convectiva ($0 < f_p < 1$);
- \tilde{u} é a velocidade efetiva do vento;
- σ_{zp} é a dispersão vertical total da fonte penetrada;
- F_y a função de distribuição lateral com meandro;
- z é assumido como z_r (altura do receptor acima da base da fonte local) para o estado de pluma horizontal e como z_p (altura de um receptor acima do terreno local) para o estado de acompanhamento do terreno;
- h_{ep} é a altura da pluma que penetra além da camada limite convectiva;
- z_{ieff} é a altura da superfície refletora na camada estável acima da camada limite convectiva.

Ainda que, tal como ocorre para outros modelos de dispersão atmosférica, o AERMOD apresente algumas limitações em relação à representação integralmente fidedigna da dinâmica da dispersão atmosférica, perpassando questões relacionadas, por exemplo, a aproximações baseadas em equações que traduzem esta dinâmica (SNOUN; KRICHEN; CHÉRIF, 2023), o modelo é amplamente utilizado por diversos profissionais e instituições de todo o mundo.

Cabe destacar que o AERMOD é recomendado pela USEPA para estimar o impacto das emissões na qualidade do ar (MULYA; SUHERMAN; NATSIR, 2023). Ademais, no âmbito do Estado de Minas Gerais, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), por meio do *Termo de Referência Para Elaboração de Um Estudo de Dispersão Atmosférica*, estabelece, quando da necessidade de elaboração de um EDA para fins de licenciamento ambiental, as orientações básicas necessárias para

elaboração do EDA, sendo o AERMOD o modelo recomendado para este tipo de estudo.

Vale mencionar que o AERMOD possui uma versão com uma interface gráfica mais intuitiva, intitulada AERMOD View™, a qual incorpora perfeitamente o AERMOD e utiliza seus mesmos mecanismos para prover a modelagem da qualidade do ar (MOKHTAR; HASSIM; TAIB, 2014; LAKES, 2022). O AERMOD, ou AERMOD View™, consistem, portanto, em uma importante ferramenta preditiva de modelagem da qualidade do ar, capaz de subsidiar análises focadas na dispersão atmosférica.

Diante do exposto, o AERMOD tem sido utilizado para avaliar a dinâmica da dispersão de poluentes em diversos empreendimentos, inclusive em aeroportos. Moradi, Shafabakhsh e Naderan (2024) avaliaram por meio do AERMOD a dinâmica da dispersão de poluentes gasosos e particulados oriundos do Aeroporto Internacional Imam Khomeini (IKIA), conhecido como um dos aeroportos internacionais mais importantes do Irã, sendo observada uma máxima concentração modelada de NO_x (1 hora) igual a 162 µg.m⁻³ na área interna do empreendimento. Bajgai e Shrestha (2023) procederam à realização de um estudo de dispersão atmosférica com uso do AERMOD em um aeroporto no Nepal, sendo observado que os poluentes dominantes foram os óxidos de nitrogênio, cuja concentração média de 24 horas foi de 158,1 µg.m⁻³, excedendo o valor limite do padrão nacional de qualidade do ar do referido país. Já Mulya, Suherman e Natsir (2023) utilizaram o AERMOD para modelar a dispersão de poluentes atmosféricos associados ao ciclo LTO no Aeroporto Internacional de Nova Yogyakarta, localizado na Indonésia, sendo modelados os poluentes CO, NO₂ e hidrocarbonetos, em que se identificou ausência de extrapolações destes poluentes quando considerados exclusivamente como fonte emissora o ciclo LTO. Além disso, Makridis e Lazaridis (2019) modelaram a dispersão atmosférica em um aeroporto localizado na Grécia com uso do AERMOD, tendo, neste estudo, os resultados sido comparados com os valores regulamentados e descritos na Diretiva da União Europeia para determinar a influência deste aeroporto na qualidade do ar local. Ademais, Kuzu (2018), utilizou o AERMOD para modelar a qualidade do ar em um aeroporto de grande porte na Turquia, sendo observado que o limite anual de NO_x foi excedido na maior parte da área do aeroporto e na área residencial a oeste do empreendimento.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho utilizou o AERMOD View™ para prover a modelagem da dispersão atmosférica relacionada às emissões do Aeroporto Carlos Drummond de Andrade, sendo que os tópicos a seguir são dedicados a explicar com mais detalhes cada etapa metodológica.

Cabe inicialmente mencionar que, tal como será detalhado no capítulo 4.3.2, as taxas de emissão utilizadas no presente trabalho têm como base o ano de 2015, uma vez que estas taxas foram obtidas por meio do inventário da FEAM, cujo ano base é 2015. Ainda que este inventário possa ser considerado relativamente defasado, o mesmo foi adotado por ser a versão mais atualizada de um inventário oficial e consistente de emissões atmosféricas, de domínio público, contemplando as emissões do Aeroporto da Pampulha.

Neste sentido, importante contextualizar que, utilizando a mais adequada das quatro grades testadas no âmbito do domínio do modelo, conforme será detalhado no capítulo em 4.3.1, foram modelados dois cenários relacionados à dinâmica da dispersão dos poluentes atmosféricos oriundos do supracitado aeroporto, sendo eles: **i) “cenário 2015”**, que considera as emissões de CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora, 24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), e MP_{2,5} (24 horas e anual), tendo como base as taxas de emissão disponibilizadas no inventário da FEAM; e **ii) “cenário 2015 + 50%”**, que considera as emissões dos mesmos poluentes, sendo eles o CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora, 24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), e MP_{2,5} (24 horas e anual), mas tendo como premissa um incremento hipotético de 50% nas taxas de emissão disponibilizadas no inventário da FEAM.

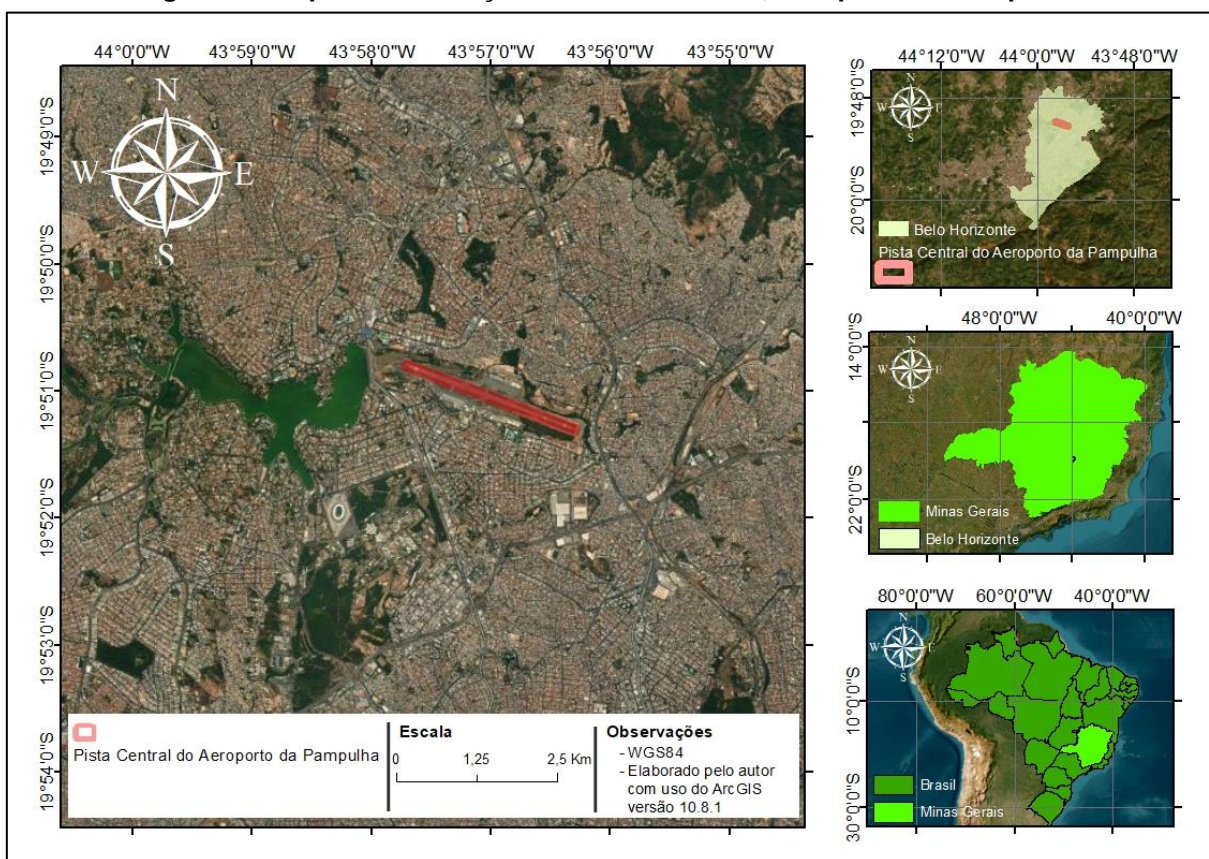
O estabelecimento destes dois cenários se mostra notável, uma vez que os resultados obtidos podem dar indícios, observadas eventuais ponderações, da dinâmica da dispersão atmosférica no entorno do Aeroporto da Pampulha em outros anos que apresentem comportamento similar a 2015 em termos operacionais (consumo de combustível, número de movimentações aeroportuárias e taxas de emissão de poluentes atmosféricos) e meteorológicos. Neste contexto, reitera-se que o número

total de movimentações de aeronaves no Aeroporto da Pampulha em 2015 foi próximo ao registrado em 2023.

4.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho consiste no Aeroporto Carlos Drummond de Andrade, popularmente conhecido como Aeroporto da Pampulha, o qual está localizado no município de Belo Horizonte (MG) e cuja pista central possui 45 metros de largura por 2.364 metros de comprimento (Figura 4).

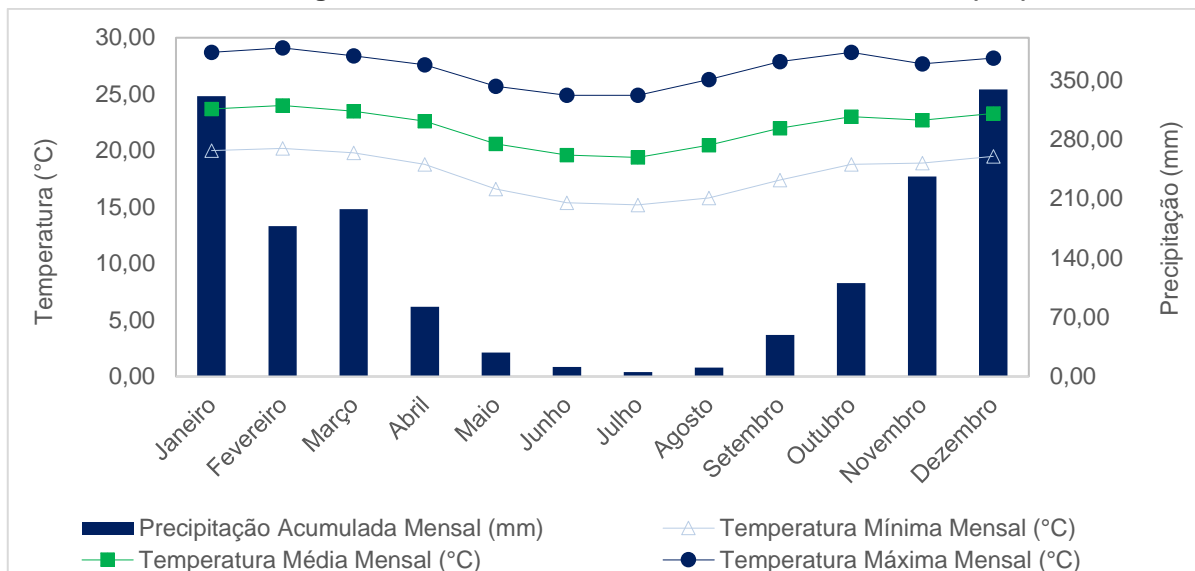
Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo, Aeroporto da Pampulha



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do ArcGis, versão 10.8.1.

Por meio da Figura 5 são apresentadas as normais climatológicas do período de 1991 a 2020 referente à precipitação média mensal e às temperaturas mínima mensal, média mensal e máxima mensal obtidas por meio da estação meteorológica do INMET 83587, que está localizada no município de Belo Horizonte (MG), sob latitude -19,934444° e longitude -43,952222°.

Figura 5 – Normais climatológicas do período de 1991 a 2020 para precipitação acumulada mensal e temperaturas mínima mensal, média mensal e máxima mensal referente à estação meteorológica do INMET 83587, localizada em Belo Horizonte (MG)

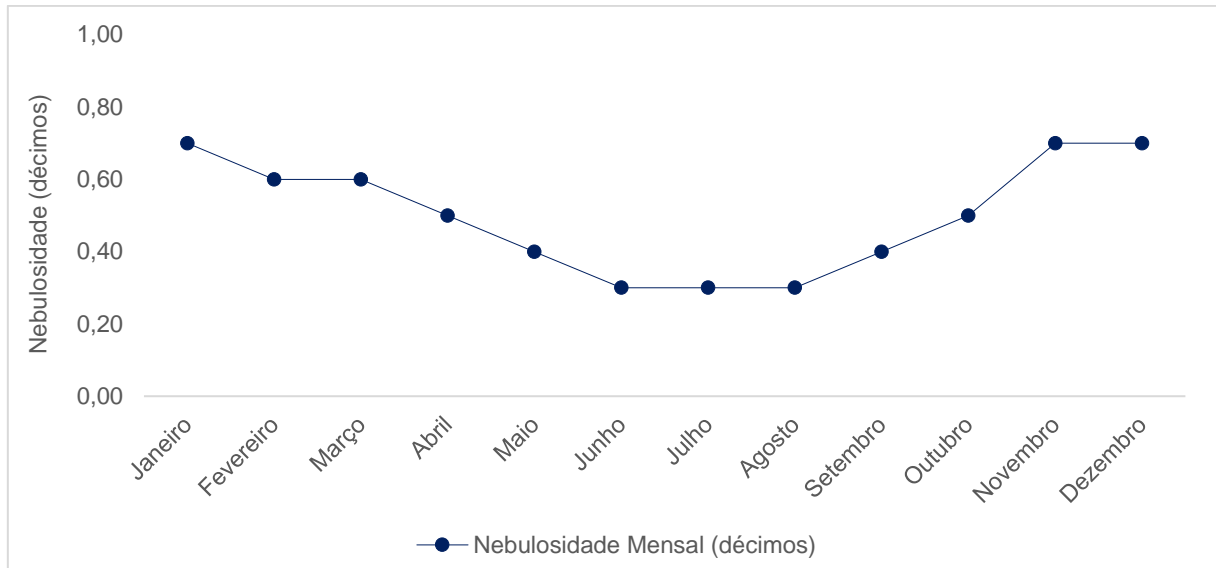


Fonte: Elaborado pelo autor com uso de dados do INMET referente à estação meteorológica 83587.

Com base nos dados apresentados na Figura 5, observa-se que a região de estudo apresenta o menor valor referente à temperatura mínima mensal em julho (15,20°C) e o maior valor em fevereiro (20,20°C), sendo o valor médio da temperatura mínima mensal igual a 18,03°C. No que se refere à temperatura média mensal, tem-se que o menor valor foi registrado em julho (19,40°C) e o maior valor em fevereiro (24,00°C), sendo o valor médio da temperatura média mensal igual a 22,08°C. A temperatura máxima mensal apresenta o menor registro nos meses de junho e julho (24,90°C) e o maior valor em fevereiro (29,10°C), sendo o valor médio da temperatura máxima mensal igual a 27,34°C. Quanto à precipitação acumulada mensal, tem-se uma variação de 5,40 mm (julho) a 339,10 mm (dezembro), sendo que a precipitação acumulada mensal média é igual a 131,53 mm.

Por meio da Figura 6 são apresentadas as normais climatológicas do período de 1991 a 2020 referente à nebulosidade mensal obtidas a partir da estação meteorológica do INMET 83587.

Figura 6 – Normais climatológicas do período de 1991 a 2020 para nebulosidade mensal referente à estação meteorológica do INMET 83587, localizada em Belo Horizonte (MG)

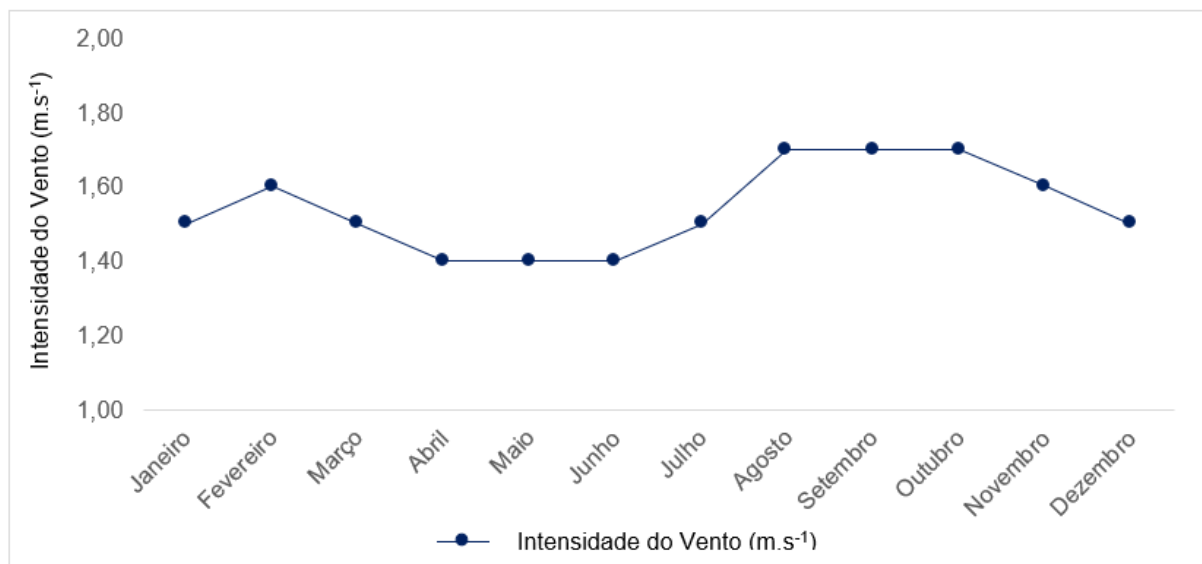


Fonte: Elaborado pelo autor com uso de dados do INMET referente à estação meteorológica 83587.

Observa-se, com base na Figura 6, que a região apresenta, em termos de nebulosidade mensal, uma variação de 0,30 (junho, julho e agosto) a 0,70 (novembro, dezembro e janeiro), sendo que a nebulosidade mensal média é igual a 0,50.

Por fim, por meio da Figura 7 são apresentadas as normais climatológicas do período de 1991 a 2020 referente à intensidade do vento, obtidas a partir da estação meteorológica do INMET 83587.

Figura 7 – Normais climatológicas do período de 1991 a 2020 para intensidade mensal dos ventos referente à estação meteorológica do INMET 83587, localizada em Belo Horizonte (MG)

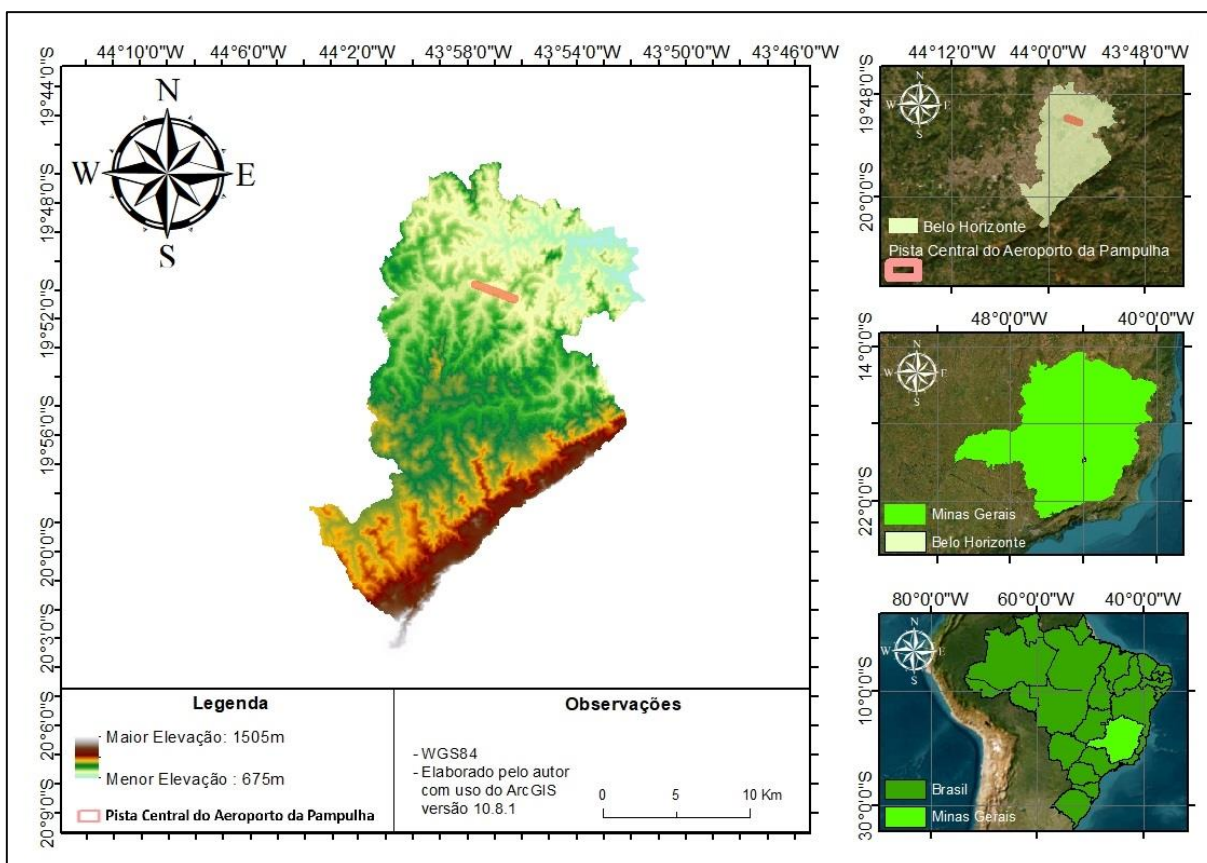


Fonte: Elaborado pelo autor com uso de dados do INMET referente à estação meteorológica 83587.

Com base nos dados apresentados na Figura 7, observa-se que a região de estudo apresenta o menor valor referente à intensidade mensal dos ventos nos meses de abril, maio e junho ($1,40 \text{ m.s}^{-1}$) e o maior valor nos meses de agosto, setembro e outubro ($1,70 \text{ m.s}^{-1}$), sendo a intensidade média mensal dos ventos igual a $1,54 \text{ m.s}^{-1}$. Cabe destacar ainda que, conforme normais climatológicas do período de 1991 a 2020, a direção predominante do vento nos meses de fevereiro, março, maio, junho, julho, agosto e setembro é de origem leste, ao passo que nos meses de janeiro, abril, outubro, novembro e dezembro predominam os ventos de origem noroeste, sendo os ventos de origem leste os que predominam sob o ponto de vista anual.

O município de Belo Horizonte (MG) possui elevação que varia de 675 metros a 1.505 metros acima do nível do mar, conforme pode ser visualizado por meio da Figura 8, a qual contém o mapa hipsométrico do referido município. Constata-se que a região onde está inserido o Aeroporto da Pampulha apresenta elevações próximas a 789 metros.

Figura 8 – Mapa hipsométrico do município de Belo Horizonte (MG), com indicação da localização do Aeroporto da Pampulha



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do ArcGIS, versão 10.8.1, a partir de dados do SRTM 1, disponibilizados pelo USGS.

4.2 Pré-Processamento Meteorológico – AERMET View™

Para viabilizar a modelagem da dispersão atmosférica com uso do AERMOD View™, previamente realizou-se o pré-processamento meteorológico da área de estudo utilizando o pré-processador AERMET View™, que é integrado ao AERMOD View™. Isto se faz necessário uma vez que o AERMOD View™ demanda os arquivos de saída do AERMET View™ cujas extensões são *.SFC* (arquivos contendo informações meteorológicas de superfície) e *.PFL* (arquivos contendo informações meteorológicas de perfil, também denominado altitude).

Este pré-processador meteorológico, cuja versão utilizada para o presente trabalho foi a 11.2.0, viabiliza a determinação de variáveis micrometeorológicas fundamentais no processo de modelagem da dispersão atmosférica, tais como velocidade de atrito, fluxo de calor superficial, escala de velocidade convectiva, altura da camada limite estável, altura da camada limite planetária e comprimento de *Monin-Obukhov* (PANDEY; VENKATRAM; ARUNACHALAM, 2023).

Para realizar o pré-processamento meteorológico, se faz necessária a inserção e definição no AERMET View™ de algumas premissas e informações, a saber: **i)** definição da área de domínio e grade meteorológica (a ser detalhado no capítulo 4.2.1); **ii)** inserção de dados meteorológicos de superfície e altitude (a ser detalhado no capítulo 4.2.2); **iii)** definição do uso e ocupação do solo da área de domínio (a ser detalhado no capítulo 4.2.3).

4.2.1. Definição da Área de Domínio e Grade Meteorológica

A grade meteorológica considerada no presente estudo é composta por um total de 400 células no eixo das abscissas e 400 células no eixo das ordenadas, sendo que cada célula possui um tamanho de 30 metros por 30 metros, coincidente, portanto, com a resolução topográfica utilizada no presente trabalho (30 metros por 30 metros), conforme será detalhado no capítulo 4.3.3. Desta forma, a área de domínio referente à meteorologia perfaz um total de 144 km².

4.2.2. Dados Meteorológicos de Superfície e Altitude

O AERMET View™ demanda a inserção de dados meteorológicos de superfície e de altitude. Cabe destacar que os dados meteorológicos, sejam eles de superfície ou altitude, podem ser obtidos por meio de estações meteorológicas com medição direta ou por modelagem baseada em modelos de prognóstico meteorológico (FEAM, 2019). Para o presente estudo, considera-se que a coleta de ambas as tipologias de dados meteorológicos (superfície e altitude) se dará a partir de estações meteorológicas com medição direta.

Os dados de superfície referentes aos parâmetros direção do vento, velocidade do vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa e precipitação foram obtidos a partir da Estação da Pampulha (A521), disponível na base do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo que esta estação se encontra a aproximadamente 4 km do ponto central do domínio modelado.

Já os dados medidos na superfície referentes à cobertura de nuvens e à altura da base de nuvens foram obtidos a partir dos dados do Relatório Meteorológico de Aeródromo (METAR, do inglês, *Meteorological Aerodrome Report*) do próprio Aeroporto da Pampulha (SBBH), disponíveis na base do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) da Força Aérea Brasileira.

Os dados de altitude referentes aos parâmetros de radiossondagem, os quais abrangeram pressão atmosférica, temperatura, temperatura do ponto de orvalho, direção do vento e velocidade do vento, foram obtidos a partir das medições realizadas no Aeroporto Internacional de Confins, que se encontra a aproximadamente 24 km do ponto central do domínio modelado (Figura 9). Destaca-se que as informações de altitude foram obtidas a partir da base da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos/Laboratórios de Pesquisa do Sistema Terrestre dos Estados Unidos (do inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration/ Earth System Research Laboratories*, NOAA/ESRL).

Cabe citar que os dados meteorológicos de superfície e altitude abrangeram o período de 01/01/2015 a 31/12/2015, de modo a ser coincidente com o ano do inventário de

fontes de emissão de poluentes atmosféricos utilizado no presente estudo, conforme será abordado no tópico 4.3.2.

Por meio da Tabela 5 são apresentados, de forma consolidada, detalhes acerca dos pontos de medição dos dados meteorológicos, bem como os respectivos parâmetros extraídos, ao passo que por meio da Figura 9 apresenta-se o mapa de localização destes pontos.

Tabela 5 – Coordenadas geográficas dos pontos de medição dos dados meteorológicos de superfície e altitude utilizadas na modelagem da dispersão atmosférica (01/01/2015 a 31/12/2015)

Tipo de Dados	Ponto de Medição			Parâmetro Extraído
	Referência	Latitude	Longitude	
Superfície	Estação da Pampulha (A521) ¹	-19,88394°	-43,96939°	Direção do vento, velocidade do vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa e precipitação.
Superfície	Aeroporto da Pampulha (SBBH) ²	-19,85166°	-43,95027°	Cobertura de nuvens e altura da base de nuvens.
Altitude	Aeroporto Internacional de Confins ³	-19,63267°	-43,96997°	Dados de radiossondagem, incluindo pressão atmosférica, temperatura, temperatura do ponto de orvalho, direção do vento e velocidade do vento.

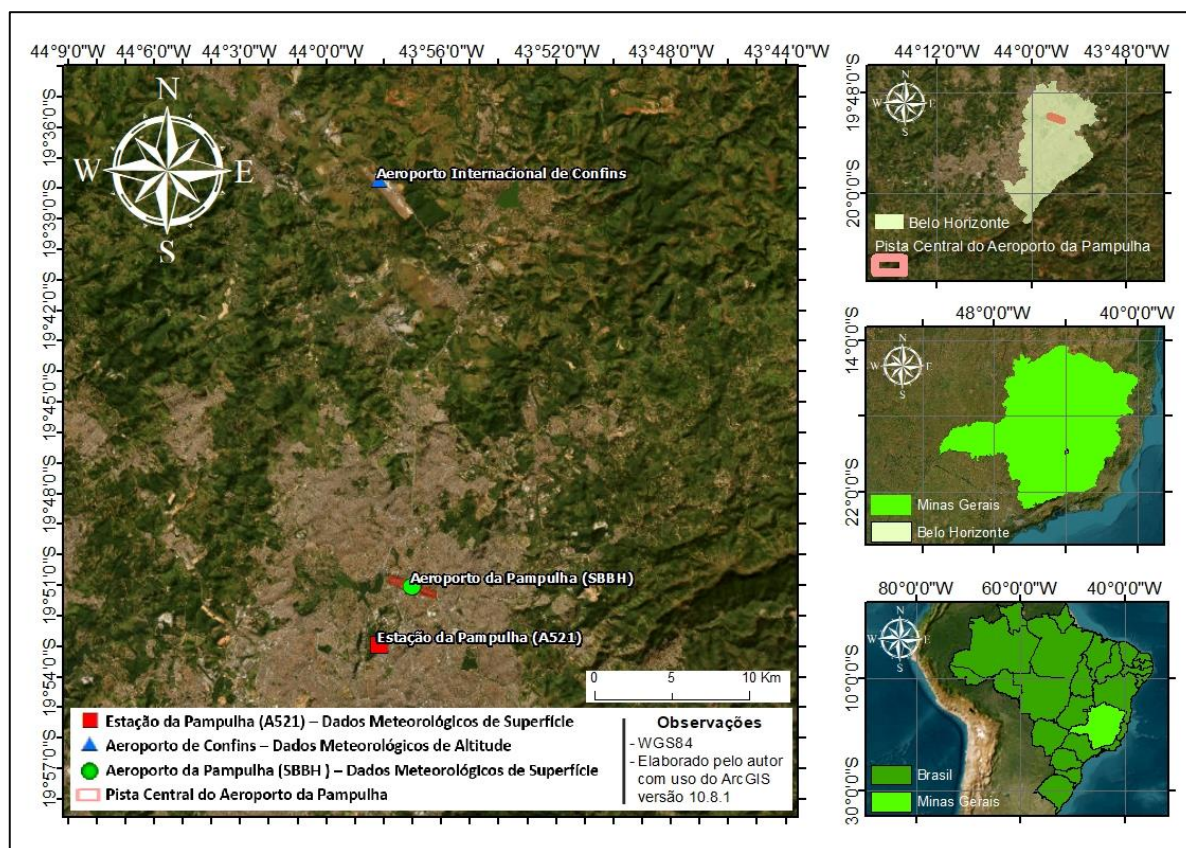
¹Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

²Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

³Dados da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos/ Laboratórios de Pesquisa do Sistema Terrestre dos Estados Unidos (do inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration/ Earth System Research Laboratories*, NOAA/ESRL).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Mapa de localização das estações meteorológicas de superfície e altitude utilizadas na modelagem da dispersão atmosférica



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do ArcGis, versão 10.8.1.

4.2.3. Uso e Ocupação do Solo

Por meio da ferramenta *Land Use Creator*, parte integrante do AERMET View™, foram definidas as classes de superfície para a região abrangida pela área de domínio do modelo, possibilitando a definição do albedo, razão de *Bowen* e rugosidade da superfície. Foi considerado um raio de 1 quilômetro em relação à estação meteorológica da Pampulha (A521) e uma divisão em 12 setores para a caracterização do solo, o que respeita o critério de raio mínimo de 30° definido pela USEPA, conforme consta no documento *AERMOD Implementation Guide* (USEPA, 2023a).

4.3 Modelagem da Dispersão Atmosférica – AERMOD View™

Concluídas as etapas anteriores, procedeu-se ao uso do AERMOD View™ para, efetivamente, ser realizada a modelagem da dispersão atmosférica das emissões oriundas do Aeroporto da Pampulha.

Para tanto, fez-se necessária a realização das seguintes ações: **i)** definição da área de domínio e grade da modelagem da dispersão atmosférica (a ser detalhado no capítulo 4.3.1); **ii)** definição das fontes emissoras, poluentes de interesse e respectivas taxas de emissão, se valendo, para tanto, de inventário de emissões atmosféricas pré-existente (a ser detalhado no capítulo 4.3.2); **iii)** levantamento de dados topográficos da área de domínio da modelagem da dispersão atmosférica (a ser detalhado no capítulo 4.3.3); **iv)** definição dos receptores discretos de interesse (a ser detalhado no capítulo 4.3.4); **v)** modelagem, propriamente dita, da dispersão atmosférica, tendo como produtos principais as isolinhas de concentração dos poluentes e as concentrações modeladas nos pontos receptores discretos (a ser detalhado no capítulo 4.3.5).

Reitera-se que foram modelados no AERMOD View™ dois cenários relacionados à dinâmica da dispersão dos poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha, de modo a refletir as emissões referentes ao ano de 2015 (“cenário 2015”) e as emissões de um cenário hipotético em que se tem um aumento de 50% sobre as emissões de 2015 (“cenário 2015 + 50%”).

4.3.1. Definição do Domínio e Grade da Modelagem da Dispersão Atmosférica

Para fins de modelagem, a delimitação da área de estudo deve considerar fatores como resolução e abrangência, de modo que seja refinada o suficiente para viabilizar a identificação das máximas concentrações de poluentes na atmosfera emitidas pelas fontes emissoras analisadas, bem como tenha características suficientes para possibilitar a visualização do alcance das isolinhas de concentração dos poluentes na área estudada. Assim, observa-se que é fundamental a adoção de uma grade que permita que a modelagem da dispersão atmosférica seja realizada de modo a atender as premissas apresentadas anteriormente.

Neste sentido, de modo a identificar uma configuração de grade que subsidie consistentemente a modelagem da dispersão atmosférica, foi realizado um teste simulando quatro distintas configurações de grade no AERMOD View™, conforme apresentado na Tabela 6, possibilitando avaliar a influência da utilização de uma grade menos refinada ou mais refinada na modelagem da dispersão atmosférica. Destaca-se que para a composição dos dois cenários a serem modelados (“cenário 2015” e

“cenário 2015 + 50%”), foi adotada apenas uma das quatro configurações de grade apresentadas na Tabela 6, sendo esta configuração utilizada na modelagem de todos os poluentes atmosféricos e respectivos períodos de referência previstos em cada um dos dois cenários supracitados (“cenário 2015” e “cenário 2015 + 50%”).

Dito isso, para a realização do teste simulando as quatro distintas configurações apresentadas na Tabela 6, foi utilizada como referência a modelagem de NO₂ (período de referência de 24 horas), codificada como ID 01, conforme consta na supracitada tabela. A esta modelagem (ID 01) procedeu-se a alterações nas características da grade modelada, variando o seu espaçamento e o número de células, mas mantendo a área total do domínio (225 km²) e todas as demais premissas da configuração ID 01, sendo assim gerados os cenários de códigos ID 02, ID 03 e ID 04.

Tabela 6 – Configurações previstas para análise da mudança de características da grade da modelagem de dispersão atmosférica

ID	Parâmetro	Espaçamento (Tamanho) das Células	Nº de Pontos no Eixo das Abscissas x Nº de Pontos no Eixo das Ordenadas	Área do Domínio (km ²)	Total de Receptores de Grade (Células)
01	NO ₂ (24h)	30 m x 30 m	500 x 500	225	250.000
02	NO ₂ (24h)	100 m x 100 m	150 x 150	225	22.500
03	NO ₂ (24h)	200 m x 200 m	75 x 75	225	5.625
04	NO ₂ (24h)	500 m x 500 m	30 x 30	225	900

Observa-se que a configuração ID 01 representa a configuração de grade mais refinada dentre as apresentadas na Tabela 6, uma vez que possui o menor espaçamento (tamanho) de células, bem como a maior quantidade de linhas (número de pontos no eixo das abscissas) e colunas (número de pontos no eixo das ordenadas). O espaçamento de células da configuração ID 01 (30 metros por 30 metros) foi assim definido para ser coincidente com a resolução topográfica utilizada no presente trabalho (30 metros por 30 metros), conforme será detalhado no capítulo 4.3.3. Para esta configuração é esperado que haja maior consumo de recursos, expressos em tempo necessário para o processamento do modelo, embora se espere que os resultados modelados sejam mais precisos quando comparado com as demais configurações de grade da Tabela 6.

Nota-se também que a configuração ID 04 consiste na grade menos refinada dentre as apresentadas na Tabela 6, uma vez que possui o maior espaçamento (tamanho)

de células, bem como a menor quantidade de linhas (número de pontos no eixo das abscissas) e colunas (número de pontos no eixo das ordenadas). O espaçamento de células da configuração ID 04 (500 metros por 500 metros) foi assim definido para ser coincidente com espaçamentos comumente utilizados, tal como já indicado pelo órgão ambiental do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Para esta configuração é esperado que haja menor consumo de recursos computacionais (tempo necessário para o processamento do modelo), ao passo que se espera que os resultados, embora representativos, sejam relativamente menos precisos quando comparado com as demais configurações de grade da Tabela 6.

As demais configurações (ID 02 e ID 03) foram concebidas para representarem arranjos intermediários entre as composições ID 01 e ID 04, sendo que para todas as configurações foi respeitada a recomendação da USEPA (USEPA, 2023d) para utilização de domínios inferiores a 50 km quando do uso deste modelo. Também cabe mencionar que todas as quatro configurações de grade consideram o Aeroporto da Pampulha ao centro da área de domínio.

4.3.2. Fontes Emissoras, Poluentes de Interesse e Inventário de Emissões Atmosféricas

A modelagem da dinâmica dos poluentes atmosféricos requer a utilização de inventários de emissões atmosféricas para subsidiar a alocação temporal e espacial destas emissões. Considerando o exposto, o presente trabalho utilizou o inventário de emissões do Aeroporto da Pampulha disponível no inventário oficial das fontes de emissão de poluentes atmosféricos da região de Belo Horizonte, Contagem e Betim (RT-CASM-314-004, Revisão 00, Ago/18, Volume I), ano base 2015, publicado em 2018 pela FEAM (FEAM, 2018).

O inventário publicado pela FEAM, que pode ser considerado relativamente como defasado por ter o seu ano base como sendo 2015, foi utilizado em função de ser a versão mais atualizada de um inventário oficial e consistente de emissões atmosféricas, de domínio público, contemplando as emissões do Aeroporto da Pampulha. Assim, não foram previstas no âmbito do presente estudo novas medições de campo e tampouco novos cálculos para complementação ou atualização do inventário publicado pela FEAM.

Cabe destacar que, embora a Tabela 1 indique que em 2015 o Aeroporto da Pampulha dispôs de uma movimentação total (pousos e decolagens) igual a 53.523, no inventário publicado pela FEAM foi considerado um número total de 51.948 movimentações, portanto, inferior em aproximadamente 2,94% em relação ao referenciado na Tabela 1. Assim, cabe mencionar que as taxas de emissões associadas ao número total de movimentações considerado no inventário publicado pela FEAM (51.948) foram refletidas nas modelagens realizadas no âmbito do presente estudo.

Tal como consta no supracitado inventário, em sua seção IV.3, intitulada “IV.3 Inventário de Emissões – Aeroportos” (Apêndice A), foram inventariados os poluentes CO, NO_x, SO_x, PTS, MP₁₀, MP_{2,5} e Compostos Orgânicos Voláteis (COV), abrangendo emissões oriundas de aeronaves e de equipamentos de apoio referentes ao Aeroporto da Pampulha. Contudo, considerando que a Resolução CONAMA nº 491/2018 e a DN COPAM nº 248/2023 não estabelecem limites para COV, este parâmetro não foi considerado nas modelagens do presente estudo.

Assim sendo, os poluentes a serem considerados no presente trabalho foram o CO, NO₂ (considerado como NO_x), SO₂ (considerado como SO_x), PTS, MP₁₀ e MP_{2,5}, tendo como base, em termos de taxa de emissão, os valores atribuídos ao Aeroporto da Pampulha que constam no inventário publicado pela FEAM.

As taxas de emissão extraídas do supracitado inventário foram divididas em duas tipologias de fontes, tal como apresentado no próprio inventário, sendo uma relacionada às aeronaves e outra relacionada aos equipamentos de apoio. Destaca-se que, conforme consta no inventário publicado pela FEAM, as taxas de emissão relacionadas às aeronaves consideram somente as emissões associadas ao ciclo LTO.

Conforme consta no inventário publicado pela FEAM, para o cálculo das taxas de emissão associadas às aeronaves foram inicialmente consolidadas as suas movimentações, expressas em número de pousos e decolagens, por aeronave, ao longo de 2015, considerando os dados fornecidos pela INFRAERO. Na sequência, a partir da consolidação dos dados de pouso e decolagem, foi possível determinar as

emissões provenientes dessa tipologia de fonte, para cada poluente, utilizando a Equação 6, considerando, para tanto, os fatores de emissão elaborados pela Agência Europeia de Meio Ambiente, publicados no capítulo 1.A.3.a *Aviation* e seus anexos, disponibilizados no *Guidebook* de 2013 e 2016. Adicionalmente, também foram utilizados fatores de emissão desenvolvidos pelo Departamento Federal de Meio Ambiente, Transporte, Energia e Comunicações da Suíça, assim como pelo Departamento de Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido e pela Agência de Proteção Ambiental Norte Americana.

$$TE_i = \sum (LTO_j * F_{i,j}) \quad (6)$$

Em que:

- TE_i é a taxa de emissão do poluente i ;
- LTO_j é o número de ciclos de LTO para a aeronave j ;
- $F_{i,j}$ é o fator de emissão para o poluente i e para a aeronave j [kg.LTO⁻¹].

Para determinados modelos de aeronaves foi necessário ainda realizar a estimativa do seu respectivo consumo de combustível, tendo este cálculo sido realizado por meio da Equação 7, que foi adaptada da expressão matemática elaborada pelo Departamento de Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido (DEFRA) em 2004.

$$C_j = N_j * t * v \quad (7)$$

Em que:

- C_j é o consumo de combustível da aeronave j ;
- N_j é o número de motores que a aeronave j possui;
- t é o tempo gasto por etapa do LTO [s], sendo que cada etapa possui um coeficiente de empuxo elaborado pela DEFRA (2004).
- v é a vazão mássica de combustível de acordo com o coeficiente de empuxo [kg.s⁻¹], sendo este dado também fornecido pela DEFRA (2004).

Com base no exposto, chegou-se às taxas de emissão, por aeronave, apresentadas na Tabela 7, por meio da qual também se apresenta o respectivo memorial de cálculo.

Tabela 7 – Taxas de emissão por aeronave (j), em 2015, no Aeroporto da Pampulha

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
A109E	A109	23	23	46	37,100	0,172	1,100	0,004	0,059	0,004	0,005	0,004	0,025	0,000	0,001	0,000	0,000
A109S	A109	9	9	18	37,957	0,180	1,122	0,004	0,061	0,004	0,006	0,002	0,010	0,000	0,001	0,000	0,000
AW109SP	A109	2	2	4	37,957	0,180	1,122	0,004	0,061	0,004	0,006	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
AB139	A139	2	2	4	60,300	0,376	0,968	0,006	0,096	0,006	0,012	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
AW139	A139	2	2	4	60,300	0,376	0,968	0,006	0,096	0,006	0,012	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
A29	A29	1	1	2	-	11,200	13,000	0,680	1,050	0,697	0,697	0,011	0,013	0,001	0,001	0,001	0,001
A319-112	A319	2	2	4	688,812	0,100	9,500	2,000	0,579	2,000	2,000	0,000	0,019	0,004	0,001	0,004	0,004
A319-132	A319	19	19	38	688,812	0,100	9,500	2,000	0,579	2,000	2,000	0,002	0,181	0,038	0,011	0,038	0,038
AB-180	AB18	1	1	2	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
500-B	AC50	1	1	2	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
690 ^a	AC90	3	3	6	94,216	1,177	0,826	0,010	0,150	0,010	0,010	0,004	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
690B	AC90	10	10	20	94,216	1,177	0,826	0,010	0,150	0,010	0,010	0,012	0,008	0,000	0,002	0,000	0,000
AC95	AC95	1	1	2	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
AS 332 L	AS32	4	4	8	77,400	0,652	0,683	0,008	0,124	0,008	0,019	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
AS 332 L2	AS32	21	21	42	77,400	0,652	0,683	0,008	0,124	0,008	0,019	0,014	0,014	0,000	0,003	0,000	0,000
AS 350 B	AS50	1	1	2	25,200	0,150	0,346	0,003	0,040	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AS 350 B2	AS50	2123	2129	4252	25,200	0,150	0,346	0,003	0,040	0,003	0,005	0,319	0,736	0,006	0,086	0,006	0,011
AS 350 B3	AS50	1110	1109	2219	27,500	0,179	0,316	0,003	0,044	0,003	0,006	0,199	0,351	0,003	0,049	0,003	0,007
AS 350 BA	AS50	11	11	22	25,200	0,150	0,346	0,003	0,040	0,003	0,005	0,002	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
HB-350B	AS50	8	8	16	25,200	0,150	0,346	0,003	0,040	0,003	0,005	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
AS 365 N2	AS65	70	70	140	44,267	0,244	0,943	0,005	0,071	0,005	0,008	0,017	0,066	0,000	0,005	0,000	0,001
AS 365 N3	AS65	131	130	261	47,700	0,285	0,860	0,005	0,076	0,005	0,009	0,037	0,112	0,001	0,010	0,001	0,001
BEM365	AS65	9	9	18	43,080	0,230	0,975	0,004	0,069	0,004	0,008	0,002	0,009	0,000	0,001	0,000	0,000
1125 WEST.ASTRA	ASTR	4	4	8	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,002	0,007	0,001	0,000	0,001	0,001
ATR-42-500	AT45	31	34	65	312,664	3,907	2,742	0,032	0,499	0,032	0,032	0,127	0,089	0,001	0,016	0,001	0,001
ATR-72-202	AT72	115	116	231	302,151	3,776	2,649	0,031	0,482	0,031	0,031	0,436	0,306	0,004	0,056	0,004	0,004

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
ATR-72-212	AT72	9	9	18	302,151	3,776	2,649	0,031	0,482	0,031	0,031	0,034	0,024	0,000	0,004	0,000	0,000
ATR-72-212 ^a	AT72	4238	4233	8471	302,151	3,776	2,649	0,031	0,482	0,031	0,031	15,992	11,222	0,133	2,043	0,133	0,133
206B	B06	53	53	106	18,760	0,081	0,479	0,002	0,030	0,002	0,003	0,004	0,025	0,000	0,002	0,000	0,000
206L-4	B06	31	31	62	22,200	0,116	0,402	0,002	0,035	0,002	0,004	0,004	0,012	0,000	0,001	0,000	0,000
B300	B350	74	75	149	95,368	0,353	0,836	0,010	0,080	0,010	0,010	0,026	0,062	0,001	0,006	0,001	0,001
B407	B407	13	13	26	23,700	0,131	0,372	0,002	0,038	0,002	0,004	0,002	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
412EP	B412	2	2	4	77,000	0,644	0,688	0,008	0,123	0,008	0,019	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
B429	B429	38	38	76	43,700	0,236	0,952	0,005	0,070	0,005	0,008	0,009	0,036	0,000	0,003	0,000	0,000
GlobalRanger	B429	1	1	2	43,700	0,236	0,952	0,005	0,070	0,005	0,008	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
B100	BE10	2	2	4	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
200T	BE20	1	1	2	95,368	0,353	0,836	0,010	0,080	0,010	0,010	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
A200	BE20	6	6	12	95,368	0,353	0,836	0,010	0,080	0,010	0,010	0,002	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
B200	BE20	314	313	627	95,368	0,353	0,836	0,010	0,080	0,010	0,010	0,111	0,262	0,003	0,025	0,003	0,003
B200GT	BE20	175	176	351	95,368	0,353	0,836	0,010	0,080	0,010	0,010	0,062	0,147	0,002	0,014	0,002	0,002
BE20	BE20	52	52	104	95,368	0,353	0,836	0,010	0,080	0,010	0,010	0,018	0,043	0,001	0,004	0,001	0,001
BE30	BE30	4	4	8	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,006	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000
F33A	BE33	18	18	36	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,001	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
F35	BE35	1	1	2	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V35B	BE35	3	3	6	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
A36	BE36	53	52	105	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,003	0,025	0,000	0,001	0,000	0,000
A36TC	BE36	1	1	2	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BE36	BE36	3	3	6	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
G36	BE36	50	50	100	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,003	0,024	0,000	0,001	0,000	0,000
400 ^a	BE40	133	132	265	227,662	2,845	1,996	0,024	0,363	0,024	0,024	0,377	0,265	0,003	0,048	0,003	0,003
95-B55	BE55	99	99	198	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,005	0,047	0,000	0,002	0,000	0,000
E55	BE55	4	4	8	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
58P	BE58	46	45	91	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,002	0,022	0,000	0,001	0,000	0,000
BE58	BE58	841	840	1681	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,043	0,402	0,001	0,016	0,001	0,001
G58	BE58	673	674	1347	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,035	0,322	0,001	0,013	0,001	0,001

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
B95	BE95	2	2	4	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
B90	BE9L	1	1	2	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
C90	BE9L	361	363	724	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,517	0,363	0,004	0,066	0,004	0,004
C90A	BE9L	374	372	746	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,533	0,374	0,004	0,068	0,004	0,004
C90GT	BE9L	52	53	105	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,075	0,053	0,001	0,010	0,001	0,001
C90GTI	BE9L	527	527	1054	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,753	0,529	0,006	0,096	0,006	0,006
E90	BE9L	13	13	26	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,019	0,013	0,000	0,002	0,000	0,000
F90	BE9T	299	295	594	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,424	0,298	0,004	0,054	0,004	0,004
C130	C130	3	3	6	-	11,200	13,000	0,680	1,050	0,697	0,697	0,034	0,039	0,002	0,003	0,002	0,002
150M	C150	22	22	44	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,002	0,015	0,000	0,001	0,000	0,000
A152	C152	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
C152	C152	618	617	1235	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,045	0,416	0,001	0,016	0,001	0,001
172 ^a	C172	2	2	4	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
172M	C172	117	117	234	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,008	0,079	0,000	0,003	0,000	0,000
172N	C172	58	58	116	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,004	0,039	0,000	0,002	0,000	0,000
172P	C172	20	20	40	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,013	0,000	0,001	0,000	0,000
172R	C172	33	33	66	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,002	0,022	0,000	0,001	0,000	0,000
172S	C172	6	6	12	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
C172	C172	4	4	8	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
R172K	C172	2	2	4	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
182N	C182	24	24	48	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,002	0,016	0,000	0,001	0,000	0,000
182P	C182	13	13	26	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
182S	C182	2	2	4	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
182T	C182	37	36	73	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,003	0,025	0,000	0,001	0,000	0,000
T182T	C182	17	17	34	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
A185F	C185	3	3	6	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
206H	C206	10	10	20	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
P206A	C206	2	2	4	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
T206H	C206	64	64	128	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,005	0,043	0,000	0,002	0,000	0,000

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
U206A	C206	3	3	6	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
U206F	C206	12	12	24	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
U206G HIDROAVIÃO	C206	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
208B	C208	846	845	1691	8,796	0,039	0,077	0,001	0,007	0,001	0,001	0,033	0,065	0,001	0,006	0,001	0,001
C208	C208	30	30	60	8,796	0,039	0,077	0,001	0,007	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
210L	C210	77	77	154	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,006	0,052	0,000	0,002	0,000	0,000
210M	C210	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
210N	C210	22	22	44	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,002	0,015	0,000	0,001	0,000	0,000
T210M	C210	4	4	8	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
T210N	C210	8	8	16	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
525 ^a	C25A	440	445	885	169,691	2,120	1,488	0,018	0,271	0,018	0,018	0,938	0,658	0,008	0,120	0,008	0,008
525B	C25B	286	286	572	169,691	2,120	1,488	0,018	0,271	0,018	0,018	0,606	0,426	0,005	0,077	0,005	0,005
525C	C25C	15	15	30	169,691	2,120	1,488	0,018	0,271	0,018	0,018	0,032	0,022	0,000	0,004	0,000	0,000
c295	C295	7	7	14	-	11,200	13,000	0,680	1,050	0,697	0,697	0,078	0,091	0,005	0,007	0,005	0,005
310D	C310	5	5	10	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,001	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
310G	C310	8	8	16	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,001	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
310Q	C310	46	48	94	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,007	0,063	0,000	0,002	0,000	0,000
310R	C310	59	61	120	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,009	0,081	0,000	0,003	0,000	0,000
402B	C402	17	17	34	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
402C	C402	1	2	3	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
421B	C421	1	1	2	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C500	C500	3	3	6	169,691	2,120	1,488	0,018	0,271	0,018	0,018	0,006	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000
C501	C501	29	30	59	169,691	2,120	1,488	0,018	0,271	0,018	0,018	0,063	0,044	0,001	0,008	0,001	0,001
C510	C510	155	156	311	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,060	0,281	0,046	0,013	0,047	0,047
C525	C525	448	447	895	169,691	2,120	1,488	0,018	0,271	0,018	0,018	0,949	0,666	0,008	0,121	0,008	0,008
550 BRAVO	C550	229	229	458	200,861	2,510	1,761	0,021	0,321	0,021	0,021	0,575	0,403	0,005	0,073	0,005	0,005
C550	C550	226	227	453	200,861	2,510	1,761	0,021	0,321	0,021	0,021	0,569	0,399	0,005	0,073	0,005	0,005
S550	C550	12	12	24	200,861	2,510	1,761	0,021	0,321	0,021	0,021	0,030	0,021	0,000	0,004	0,000	0,000

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
560 ULTRA	C560	1	1	2	225,107	2,813	1,974	0,023	0,359	0,023	0,023	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
C560	C560	13	14	27	225,107	2,813	1,974	0,023	0,359	0,023	0,023	0,038	0,027	0,000	0,005	0,000	0,000
560XL	C56X	460	458	918	225,107	2,813	1,974	0,023	0,359	0,023	0,023	1,291	0,906	0,011	0,165	0,011	0,011
C650	C650	84	84	168	226,937	2,836	1,990	0,024	0,362	0,024	0,024	0,238	0,167	0,002	0,030	0,002	0,002
C680	C680	91	92	183	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,036	0,166	0,027	0,007	0,028	0,028
172RG	C72R	95	95	190	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,003	0,571	0,008	0,000	0,011	0,011
C750	C750	14	13	27	303,923	3,798	2,665	0,032	0,485	0,032	0,032	0,051	0,036	0,000	0,007	0,000	0,000
FR182	C82R	1	1	2	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
R182	C82R	1	1	2	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
BD-100-1 ^a 10	CL30	76	76	152	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,029	0,138	0,022	0,006	0,023	0,023
LC42-550FG	COL3	1	1	2	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
T240	COL4	4	4	8	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-110	E110	56	56	112	183,684	1,690	1,611	0,019	0,154	0,019	0,019	0,095	0,090	0,001	0,009	0,001	0,001
BEM-110C	E110	2	2	4	183,684	1,690	1,611	0,019	0,154	0,019	0,019	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-110E	E110	2	2	4	183,684	1,690	1,611	0,019	0,154	0,019	0,019	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-110P1	E110	35	35	70	183,684	1,690	1,611	0,019	0,154	0,019	0,019	0,059	0,056	0,001	0,005	0,001	0,001
BEM-110S1	E110	93	94	187	183,684	1,690	1,611	0,019	0,154	0,019	0,019	0,158	0,151	0,002	0,014	0,002	0,002
BEM-120QC	E120	1	1	2	1171,092	16,241	10,269	0,122	0,984	0,122	0,122	0,016	0,010	0,000	0,001	0,000	0,000
BEM-120RT	E120	60	60	120	1171,092	16,241	10,269	0,122	0,984	0,122	0,122	0,974	0,616	0,007	0,059	0,007	0,007
BEM-121 ^a	E121	26	27	53	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,038	0,027	0,000	0,005	0,000	0,000
BEM-121 ^a 1	E121	97	96	193	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,138	0,097	0,001	0,018	0,001	0,001
BEM-135BJ	E135	15	15	30	393,339	4,915	3,449	0,041	0,628	0,041	0,041	0,074	0,052	0,001	0,009	0,001	0,001
BEM-135LR	E135	57	57	114	393,339	4,915	3,449	0,041	0,628	0,041	0,041	0,280	0,197	0,002	0,036	0,002	0,002
BEM-145LR	E145	2	2	4	314,162	2,912	2,755	0,033	0,264	0,033	0,033	0,006	0,006	0,000	0,001	0,000	0,000
BEM-145MP	E145	20	20	40	314,162	2,912	2,755	0,033	0,264	0,033	0,033	0,058	0,055	0,001	0,005	0,001	0,001
ERJ 190-100 IGW	E190	225	225	450	614,664	5,747	5,390	0,064	0,516	0,064	0,064	1,293	1,213	0,014	0,116	0,014	0,014
ERJ 190-200 LR	E190	32	32	64	614,664	5,747	5,390	0,064	0,516	0,064	0,064	0,184	0,172	0,002	0,017	0,002	0,002
ERJ 190-200 IGW	E195	1	1	2	614,664	5,747	5,390	0,064	0,516	0,064	0,064	0,006	0,005	0,000	0,001	0,000	0,000

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
E314	E314	7	7	14	-	11,200	13,000	0,680	1,050	0,697	0,697	0,078	0,091	0,005	0,007	0,005	0,005
BEM-500	E50P	887	885	1772	340,000	0,740	34,070	0,035	0,340	0,035	0,035	0,656	30,186	0,031	0,301	0,031	0,031
BEM-505	E55P	291	292	583	161,759	0,819	1,418	0,017	0,136	0,017	0,017	0,239	0,413	0,005	0,040	0,005	0,005
EC 120 B	EC20	39	39	78	18,800	0,082	0,165	0,002	0,030	0,002	0,003	0,003	0,006	0,000	0,001	0,000	0,000
EC 225 LP	EC25	31	31	62	27,500	0,179	0,316	0,003	0,044	0,003	0,006	0,006	0,010	0,000	0,001	0,000	0,000
EC 130 B4	EC30	116	117	233	27,500	0,179	0,316	0,003	0,044	0,003	0,006	0,021	0,037	0,000	0,005	0,000	0,001
EC 130 T2	EC30	75	76	151	27,500	0,179	0,316	0,003	0,044	0,003	0,006	0,014	0,024	0,000	0,003	0,000	0,000
EC130T2	EC30	15	16	31	27,500	0,179	0,316	0,003	0,044	0,003	0,006	0,003	0,005	0,000	0,001	0,000	0,000
EC 135P2+	EC35	65	65	130	8,796	0,039	0,077	0,001	0,007	0,001	0,001	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
BK 117 C-2	EC45	157	157	314	44,400	0,245	0,933	0,005	0,071	0,005	0,008	0,038	0,146	0,001	0,011	0,001	0,001
EC 155 B1	EC55	21	21	42	51,000	0,328	0,800	0,005	0,081	0,005	0,010	0,007	0,017	0,000	0,002	0,000	0,000
Exec	EXEC	1	1	2	5,100	0,011	5,118	0,001	0,008	0,001	0,001	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
FALCON 2000EX	F2TH	46	46	92	320,700	0,000	6,000	0,100	0,261	0,100	0,100	0,000	0,276	0,005	0,012	0,005	0,005
FALCON 2000EX (EASY)	F2TH	2	2	4	320,700	0,000	6,000	0,100	0,261	0,100	0,100	0,000	0,012	0,000	0,001	0,000	0,000
FALCON 900	F900	4	4	8	287,341	3,591	2,520	0,030	0,459	0,030	0,030	0,014	0,010	0,000	0,002	0,000	0,000
FALCON 50	FA50	2	2	4	287,341	3,591	2,520	0,030	0,459	0,030	0,030	0,007	0,005	0,000	0,001	0,000	0,000
FALCON 7X	FA7X	7	7	14	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,003	0,013	0,002	0,001	0,002	0,002
G150	G150	11	11	22	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,004	0,020	0,003	0,001	0,003	0,003
GULFSTREAM 200	GALX	37	36	73	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,014	0,066	0,011	0,003	0,011	0,011
BD-700-1 ^a 11	GL5T	1	1	2	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
BD-700-1 ^a 10	GLEX	15	15	30	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,006	0,027	0,004	0,001	0,005	0,005
GIV-X	GLF4	3	3	6	707,347	8,839	6,203	0,073	1,129	0,073	0,073	0,027	0,019	0,000	0,003	0,000	0,000
GV-SP	GLF5	1	1	2	620,131	7,749	5,438	0,064	0,990	0,064	0,064	0,008	0,005	0,000	0,001	0,000	0,000
HS125-400B	H25A	1	1	2	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
BAE125-800 ^a	H25B	59	60	119	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,023	0,108	0,017	0,005	0,018	0,018
BAE125-800B	H25B	17	17	34	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,007	0,031	0,005	0,001	0,005	0,005
HAWKER 800	H25B	13	14	27	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,005	0,024	0,004	0,001	0,004	0,004

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
HAWKER 850XP	H25B	1	1	2	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
HAWKER 900XP	H25B	19	19	38	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,007	0,034	0,006	0,002	0,006	0,006
HS125-700 ^a	H25B	16	17	33	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,006	0,030	0,005	0,001	0,005	0,005
Dornier 328JET	J328	1	1	2	288,752	3,947	2,672	0,030	0,461	0,030	0,030	0,004	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
31 ^a	LJ31	19	20	39	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,008	0,035	0,006	0,002	0,006	0,006
LJ31	LJ31	5	5	10	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,002	0,009	0,001	0,000	0,002	0,002
35 ^a	LJ35	210	211	421	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,082	0,381	0,062	0,017	0,064	0,064
36 ^a	LJ35	13	13	26	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,005	0,024	0,004	0,001	0,004	0,004
45 (LEARJET 40)	LJ40	8	8	16	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,003	0,014	0,002	0,001	0,002	0,002
LJ45	LJ45	56	57	113	211,073	2,638	1,851	0,022	0,337	0,022	0,022	0,149	0,105	0,001	0,019	0,001	0,001
LJ60	LJ60	5	5	10	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,002	0,009	0,001	0,000	0,002	0,002
Learjet 75	LJ75	4	4	8	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,002	0,007	0,001	0,000	0,001	0,001
BEM-2B-36 ^a	BEM2	31	31	62	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,044	0,031	0,000	0,006	0,000	0,000
BEM-2B-60	BEM2	27	27	54	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,039	0,027	0,000	0,005	0,000	0,000
BEM-300	BEM30	1	1	2	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
P.180	P180	6	6	12	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,009	0,006	0,000	0,001	0,000	0,000
BEM-712	P28A	126	125	251	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,009	0,085	0,000	0,003	0,000	0,000
PA-28-140	P28A	4	4	8	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-28-151	P28A	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-28-161	P28A	12	12	24	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-28-180	P28A	12	12	24	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-28-181	P28A	2	2	4	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-710	P28B	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-711B	P28R	2	2	4	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-711C	P28R	84	82	166	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,006	0,056	0,000	0,002	0,000	0,000
PA-28R-200	P28R	13	13	26	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-28R-201T	P28R	39	40	79	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,003	0,027	0,000	0,001	0,000	0,000

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
BEM-711ST	P28T	108	108	216	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,008	0,073	0,000	0,003	0,000	0,000
BEM-711T	P28T	3	3	6	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-28RT-201T	P28T	11	10	21	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
P3 ORION	P3	4	4	8	-	11,200	13,000	0,680	1,050	0,697	0,697	0,045	0,052	0,003	0,004	0,003	0,003
BEM-721D	P32R	12	12	24	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-32R-301	P32R	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-46-500TP	P46T	181	181	362	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,029	0,867	0,021	0,007	0,021	0,021
P.68 R VICTOR	P68	2	2	4	11,793	0,051	0,478	0,001	0,019	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-23-250	PA27	9	9	18	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,054	0,001	0,000	0,001	0,001
PA-30	PA30	3	3	6	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-820C NAVAJO	PA31	32	32	64	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,005	0,043	0,000	0,002	0,000	0,000
PA-31	PA31	14	14	28	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,002	0,019	0,000	0,001	0,000	0,000
PA-31-325	PA31	12	12	24	33,284	0,145	1,348	0,004	0,053	0,004	0,004	0,002	0,016	0,000	0,001	0,000	0,000
BEM-720C	PA32	1	1	2	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-720D	PA32	61	61	122	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,004	0,041	0,000	0,002	0,000	0,000
PA-32R-301T	PA32	4	4	8	16,642	0,072	0,674	0,002	0,027	0,002	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
BEM-810C	PA34	94	97	191	33,835	0,147	1,371	0,004	0,054	0,004	0,004	0,014	0,131	0,000	0,005	0,000	0,000
BEM-810D	PA34	453	456	909	33,835	0,147	1,371	0,004	0,054	0,004	0,004	0,067	0,623	0,002	0,025	0,002	0,002
PA-34-200	PA34	105	104	209	33,835	0,147	1,371	0,004	0,054	0,004	0,004	0,015	0,143	0,000	0,006	0,000	0,000
PA-34-200T	PA34	3	3	6	33,835	0,147	1,371	0,004	0,054	0,004	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-34-220T	PA34	396	393	789	33,835	0,147	1,371	0,004	0,054	0,004	0,004	0,058	0,541	0,001	0,021	0,001	0,001
PA-46-350P	PA46	12	12	24	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,072	0,001	0,000	0,001	0,001
PA-46R-350T	PA46	120	120	240	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,004	0,721	0,010	0,001	0,014	0,014
BEM-820C CARAJA	PAT4	139	139	278	33,284	0,416	0,292	0,003	0,053	0,003	0,003	0,058	0,041	0,000	0,007	0,000	0,000
PA-31T1	PAY1	8	8	16	33,284	0,416	0,292	0,003	0,053	0,003	0,003	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-31T	PAY2	3	4	7	33,284	0,416	0,292	0,003	0,053	0,003	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-31T2	PAY2	12	13	25	33,284	0,416	0,292	0,003	0,053	0,003	0,003	0,005	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000

(continua)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
PA-42	PAY3	2	2	4	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
PA-42-720	PAY3	339	338	677	114,368	1,429	1,003	0,012	0,183	0,012	0,012	0,484	0,339	0,004	0,062	0,004	0,004
PC-12	PC12	4	4	8	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,001	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000
PC-12/45	PC12	125	125	250	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,020	0,599	0,015	0,005	0,015	0,015
PC-12/47	PC12	2	2	4	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
PC-12/47E	PC12	32	32	64	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,005	0,153	0,004	0,001	0,004	0,004
PRM1	PRM1	139	138	277	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,054	0,251	0,041	0,011	0,042	0,042
R22	R22	130	130	260	6,200	0,013	6,214	0,001	0,010	0,001	0,001	0,002	0,808	0,000	0,001	0,000	0,000
R22 BETA	R22	35	35	70	6,200	0,013	6,214	0,001	0,010	0,001	0,001	0,000	0,217	0,000	0,000	0,000	0,000
R44	R44	1009	1010	2019	8,800	0,018	8,785	0,001	0,014	0,001	0,001	0,018	8,868	0,001	0,014	0,001	0,001
R44 II	R44	749	750	1499	8,800	0,018	8,785	0,001	0,014	0,001	0,001	0,013	6,584	0,001	0,011	0,001	0,001
R66	R66	49	49	98	8,800	0,018	8,785	0,001	0,014	0,001	0,001	0,001	0,430	0,000	0,001	0,000	0,000
N-591-290	RGNT	1	1	2	-	0,079	14,100	0,208	0,008	0,302	0,302	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000
RV10	RV10	25	25	50	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,010	0,045	0,007	0,002	0,008	0,008
EXPERIMENTA L	RV6	4	4	8	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000
	RV7	2	2	4	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
S-76 ^a	S76	3	4	7	46,900	0,278	0,898	0,005	0,075	0,005	0,009	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
S-76C	S76	7	5	12	48,200	0,291	0,850	0,005	0,077	0,005	0,009	0,002	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
S-92 ^a	S92	2	2	4	98,500	1,066	0,529	0,010	0,157	0,010	0,029	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
SR20	SR20	137	137	274	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,004	0,823	0,011	0,001	0,016	0,016
SR22	SR22	595	596	1191	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,019	3,579	0,049	0,003	0,070	0,070
A75N1	ST75	1	1	2	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
TBM700B	TBM7	1	1	2	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
TBM700N	TBM7	136	137	273	-	0,162	4,790	0,116	0,037	0,118	0,118	0,022	0,654	0,016	0,005	0,016	0,016
TUCANO	TUCA	25	25	50	-	11,200	13,000	0,680	1,050	0,697	0,697	0,280	0,325	0,017	0,026	0,017	0,017
UltraLeve – A1P	ULAC	31	31	62	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,001	0,186	0,003	0,000	0,004	0,004
UltraLeve – L1P	ULAC	7	7	14	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,042	0,001	0,000	0,001	0,001
UNIV	UNIV	6	6	12	-	0,033	6,010	0,082	0,005	0,118	0,118	0,000	0,036	0,000	0,000	0,001	0,001

(conclusão)

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – Ano Base 2015					Combustível queimado (kg.LTO ⁻¹) (Equação 7)	Fatores de emissão (kg.LTO ⁻¹)						Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹) (Equação 6)					
Modelo Aeronave	Sigla	Pousos	Decolagens	Total		NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
1124 ^a	WW24	18	18	36	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,007	0,033	0,005	0,001	0,005	0,005
WW24	WW24	10	10	20	-	0,388	1,810	0,294	0,081	0,302	0,302	0,004	0,018	0,003	0,001	0,003	0,003
Total												32,262	85,512	0,819	4,494	0,866	0,878

Fonte: Adaptado de FEAM (2018).

Conforme indicado no inventário publicado pela FEAM, no que se refere ao cálculo das taxas de emissão associadas aos equipamentos de apoio, procedeu-se inicialmente à consolidação do consumo de combustível associado a esta tipologia, ao longo de 2015, considerando os dados fornecidos pela INFRAERO. Na sequência, a partir da consolidação deste consumo, foi possível determinar as emissões provenientes dessa tipologia de fonte, para cada poluente, utilizando a Equação 8, considerando, para tanto, os fatores de emissão elaborados pela Agência Europeia de Meio Ambiente e publicados no capítulo 1.A.4 *Non Road Mobile Machinery* do *Guidebook* de 2016, sendo assumido que todo o enxofre no combustível é transformado em SO₂.

$$TE_i = C * F_i \quad (8)$$

Em que:

- TE_i é a taxa de emissão do poluente i ;
- C é o consumo de combustível [$l.ano^{-1}$];
- F_i é o fator de emissão para o poluente i [$kg.l^{-1}$].

Vale mencionar que as especificações de teor de enxofre (máximo teor igual a 500 mg.kg⁻¹, considerando diesel S500) e massa específica (igual a 842,5 kg.m⁻³ a 20°, considerando diesel S500) estabelecidos pela Resolução ANP N° 65/2011 (BRASIL, 2011) foram empregadas para o cálculo das taxas de emissão associadas aos equipamentos de apoio do Aeroporto da Pampulha. Com base no exposto, chegou-se às taxas de emissão para os equipamentos de apoio apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Taxas de emissão para equipamentos de apoio, em 2015, no Aeroporto da Pampulha

Dados Fornecidos Pela INFRAERO – 2015		Taxa de Emissão (tonelada.ano ⁻¹)					
Consumo de Combustível (litros)	Tipo de Combustível	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
9.379,08	Diesel	0,258	0,085	0,017	0,008	0,017	0,017

Fonte: FEAM (2018).

Desta forma, a partir dos dados apresentados na Tabela 7 e Tabela 8, chegou-se às taxas de emissão gerais do Aeroporto da Pampulha (Tabela 9) para cada poluente de interesse.

Tabela 9 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha (tonelada.ano⁻¹)

Taxas de Emissão Total (tonelada.ano ⁻¹)						
Fonte	NO _x	CO	MP _{2,5}	SO _x	MP ₁₀	MP
Aeronaves (ciclo LTO)	32,262	85,512	0,819	4,494	0,866	0,878
Equipamentos de apoio	0,258	0,085	0,017	0,008	0,017	0,017
Total	32,520	85,597	0,836	4,502	0,883	0,895

Fonte: FEAM (2018).

Em linha ao que também foi assumido por Makridis e Lazaridis (2019), Groma *et al.* (2018), Kuzu (2018), Arunachalam *et al.* (2017), Penn *et al.* (2015), Simonetti, Maltagliati e Manfrida (2015) e Zhou e Levy (2009), para o presente estudo as fontes associadas ao Aeroporto da Pampulha foram consideradas como sendo do tipo área. Neste sentido, importante mencionar que para fontes do tipo área o AERMOD View™ demanda que a taxa de emissão seja inserida em g.s⁻¹.m². Assim, tendo em vista que a área de contribuição das fontes associadas a aeronaves foi considerada como sendo de 262.677,0 m² e a área de contribuição das fontes associadas aos equipamentos de apoio como sendo de 76.741,4 m², chegou-se às taxas de emissão apresentadas na Tabela 10, por meio da qual são apresentadas as taxas de emissão em g.s⁻¹.m² consideradas para o “cenário 2015” e para o “cenário 2015 + 50%”.

Tabela 10 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha (g.s⁻¹.m².10⁻⁶)

Taxas de Emissão Total (g.s ⁻¹ .m ² .10 ⁻⁶)				
Parâmetro	Fonte			
	Cenário 2015		Cenário 2015 + 50%	
	Aeronaves (ciclo LTO)	Equipamentos de apoio	Aeronaves (ciclo LTO)	Equipamentos de apoio
NO_x	3,895	0,107	5,842	0,160
CO	10,323	0,035	15,484	0,053
MP_{2,5}	0,099	0,007	0,148	0,010
SO_x	0,543	0,003	0,814	0,005
MP₁₀	0,105	0,007	0,157	0,010
MP	0,106	0,007	0,159	0,010

Fonte: Adaptado de FEAM (2018).

Por fim, destaca-se que as emissões associadas aos equipamentos de apoio foram fixadas em 1,0 metro de altura em relação ao nível do solo. Já as fontes de emissão referentes às aeronaves foram consideradas como fontes ao nível do solo, sendo a altura de liberação dos poluentes fixada em 2,0 metros acima do solo, de forma semelhante ao utilizado por Makridis e Lazaridis (2019) em seu estudo envolvendo a modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos provenientes de atividades no Aeroporto de Chania, na Grécia.

4.3.3. Levantamento de Dados Topográficos

Os dados topográficos para uso na modelagem da dispersão atmosférica foram obtidos a partir da base do Serviço Geológico dos Estados Unidos (do inglês, *United States Geological Survey*, USGS), sendo estes dados oriundos da Missão Topográfica Radar Shuttle 1 (do inglês, *Shuttle Radar Topography Mission 1*, SRTM 1), cuja resolução espacial é de 30 metros.

4.3.4. Definição dos Pontos Receptores Discretos

A definição dos pontos receptores discretos (PRD's) é de fundamental importância para o processo de modelagem por meio do AERMOD View™, uma vez que estes consistem nos pontos em que se deseja conhecer a dinâmica da dispersão dos poluentes atmosféricos de forma detalhada, sob uma ótica qualitativa e quantitativa, sendo suas concentrações geradas e indicadas de forma explícita no modelo. Cabe mencionar que os PRD's se diferenciam dos pontos receptores cartesianos (receptores de grade), uma vez que estes últimos consistem no ponto de cruzamento entre as linhas da grade de modelagem.

Para o presente estudo, a definição dos PRD's levou em consideração locais externos ao Aeroporto da Pampulha, localizados no entorno do empreendimento, sendo de uso público, diretamente associados à presença de grande fluxo de pessoas e/ou caracterizados por se enquadrarem em uma das seguintes tipologias: **i)** parque municipal de responsabilidade da Prefeitura de Belo Horizonte (BELO HORIZONTE, 2022); **ii)** patrimônio mundial cultural ou natural (IPHAN, 2022); **iii)** universidade pública de ensino superior; **iv)** residências limítrofes ao Aeroporto da Pampulha; **v)** área de lazer no entorno do Aeroporto da Pampulha.

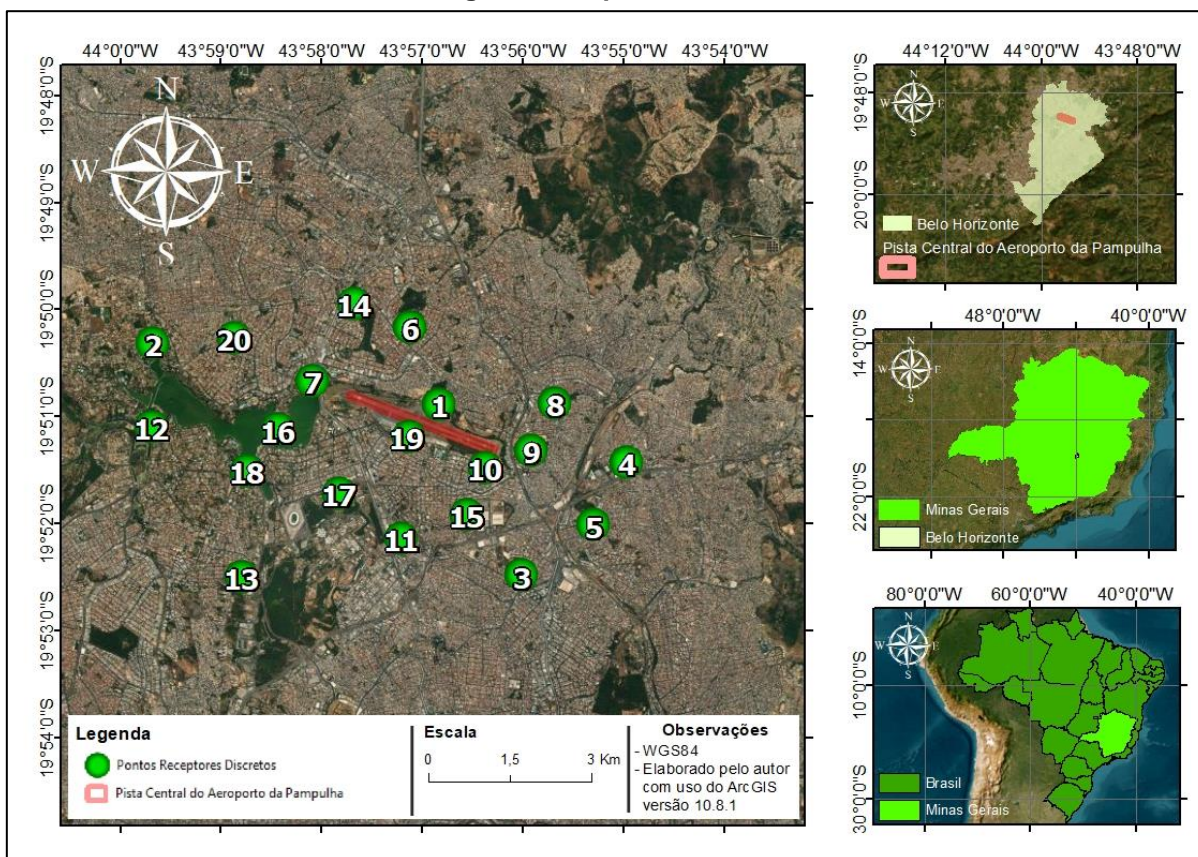
Com base nos critérios definidos, foram considerados 20 receptores discretos, os quais estão detalhados na Tabela 11.

Tabela 11 – Coordenadas geográficas dos pontos receptores discretos definidos para a modelagem da dispersão atmosférica

Pontos Receptores Discretos		Coordenadas UTM, WGS84	
Nº	Local de Referência	Longitude	Latitude
1	Residência ao norte do Aeroporto da Pampulha	610241,00	7805002,00
2	Área de lazer a noroeste da Lagoa da Pampulha	605291,00	7806090,00
3	Parque Municipal Renato Azeredo	611648,00	7802045,00
4	Parque Tião dos Santos	613493,00	7803980,00
5	Parque Municipal Professor Guilherme Lage	612915,00	7802906,00
6	Parque do Bairro Planalto	609751,00	7806336,00
7	Academia ao Ar Livre na Lagoa da Pampulha	608052,00	7805428,00
8	Parque Nossa Senhora da Piedade	612260,00	7805004,00
9	Parque Ecológico Primeiro de Maio	611845,00	7804192,00
10	Parque Dona Clara	611035,00	7803906,00
11	Parque Ecológico do Brejinho	609587,00	7802692,00
12	Parque Ecológico da Pampulha	605257,00	7804636,00
13	Parque Elias Michel Farah	606799,00	7802054,00
14	Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado	608781,00	7806752,00
15	Parque Ecológico do Bairro Universitário	610716,00	7803089,00
16	Museu de Arte da Pampulha	607460,00	7804584,00
17	UFMG (Departamento de Registro e Controle)	608507,00	7803474,00
18	Igreja São Francisco de Assis (Igreja da Pampulha)	606904,00	7803869,00
19	Residência ao sul ao Aeroporto da Pampulha	609718,04	7804455,01
20	Avenida Virgílio de Melo Franco	606710,00	7806173,00

A espacialização geográfica dos receptores discretos referenciados na Tabela 11 é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Mapa de localização dos pontos receptores discretos definidos para inclusão na modelagem da dispersão atmosférica



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do ArcGis, versão 10.8.1.

4.3.5. Modelagem da Dispersão Atmosférica

Os arquivos contendo informações meteorológicas de superfície (cuja extensão é *.SFC*) e informações meteorológicas de perfil, também denominado altitude (cuja extensão é *.PFL*), gerados no pré-processamento meteorológico (abordado no capítulo 4.2) foram inseridos no AERMOD View™.

Na sequência, utilizou-se o AERMOD View™, em sua configuração *default*, sendo também inseridas no modelo as configurações da área de domínio (abordado no capítulo 4.3.1). Cabe destacar que não foram considerados os mecanismos de depleção e deposição nas modelagens realizadas no âmbito do presente trabalho. Ademais, foram inseridas as informações associadas às fontes emissoras dos poluentes de interesse, abrangendo localização das fontes, taxas de emissão e período de referência de modelagem de cada poluente (abordado no capítulo 4.3.2), bem como foram introduzidos os dados topográficos (abordado no capítulo 4.3.3) e alocados os pontos receptores discretos (abordado no capítulo 4.3.4).

Uma vez inseridas todas estas informações no AERMOD View™, o modelo se encontrou apto para efetivamente ser rodado e viabilizar tanto a geração das concentrações estimadas dos poluentes modelados para cada cenário, quanto a produção das isolinhas de concentração destes poluentes para cada cenário, sendo geradas 13 isolinhas de concentração para o “cenário 2015” e 13 isolinhas de concentração associadas ao “cenário 2015 + 50%” (Tabela 12).

Tabela 12 – Resumo das isolinhas de concentração (plumas) geradas para cada cenário modelado

Parâmetro	Número Total de Isolinhas de Concentração Previsto Por Cenário		Detalhamento das Isolinhas de Concentração
	Cenário 2015	Cenário 2015 + 50%	
CO	01	01	Concentração máxima de 8 horas
	01	01	Concentração máxima de 24 horas
NO ₂	01	01	Concentração máxima de 1 hora
	01	01	Concentração máxima de 24 horas
SO ₂	01	01	Concentração média anual
	01	01	Concentração máxima de 24 horas
PTS	01	01	Concentração média anual
	01	01	Concentração máxima de 24 horas
MP ₁₀	01	01	Concentração média anual
	01	01	Concentração máxima de 24 horas
MP _{2,5}	01	01	Concentração média anual
	01	01	Concentração máxima de 24 horas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Importante mencionar que os resultados das modelagens considerando o curto prazo (1 hora, 8 horas ou 24 horas) representam uma composição dos valores máximos modelados em cada ponto receptor, abrangendo todo o período considerado, sendo uma análise de elevada importância, uma vez que permite analisar em um contexto amplo os potenciais máximos de ocorrência de determinada concentração no curto período em determinada área de interesse.

Já os resultados das modelagens considerando o longo prazo (média anual) representa a média de todo o período modelado, possibilitando verificar as áreas que

mais frequentemente podem ser afetadas em decorrência das emissões consideradas.

Ao término desta etapa, ou seja, concluídas as modelagens de dispersão atmosférica previstas para ambos os cenários (“cenário 2015” e “cenário 2015 + 50%”), os resultados foram comparados com os respectivos padrões de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 (Tabela 2), Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 (Tabela 3) e pelas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS (OMS, 2021) (Tabela 4).

Cabe mencionar que a Resolução CONAMA nº 491/2018, Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 e a OMS trazem consigo limites para SO₂ e NO₂ em vez de SO_x e NO_x, respectivamente, sendo que estes dois últimos poluentes são os referenciados no inventário publicado pela FEAM, utilizado no presente estudo. Assim, visando balizar os resultados de SO_x e NO_x obtidos a partir das modelagens em relação aos limites apresentados pela Resolução CONAMA nº 491/2018, Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 e pela OMS, as taxas de emissão de SO_x e NO_x foram consideradas como sendo de SO₂ e NO₂, respectivamente. Conseqüentemente, os resultados modelados de SO₂ e NO₂ foram comparados com os respectivos limites de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023 e pela OMS. Trata-se, portanto, de uma abordagem conservadora, uma vez que todos os óxidos de enxofre foram considerados como sendo dióxidos de enxofre e todos os óxidos de nitrogênio foram assumidos como sendo dióxidos de nitrogênio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões são apresentados a seguir, por capítulos, sendo que o capítulo 5.1 se dedica às Taxas de Emissão, o capítulo 5.2 ao Pré-Processamento Meteorológico, o capítulo 5.3 ao Teste de Grade do Domínio da Modelagem de Dispersão Atmosférica, o capítulo 5.4 à Modelagem da Dispersão Atmosférica (“cenário 2015”) e o capítulo 5.5 à Modelagem da Dispersão Atmosférica (“cenário 2015 + 50%”).

5.1. Taxas de Emissão

As taxas de emissão consistem em um elemento fundamental para a composição de um adequado inventário de emissões de poluentes atmosféricos. Neste sentido, cabe mencionar que Simonetti, Maltagliati e Manfrida (2015) também utilizaram o AERMOD para modelar a dinâmica da dispersão atmosférica em um aeroporto, Amerigo Vespucci, localizado em Florença, na Itália, com movimentação similar ao do presente trabalho. Os autores consideraram em seu estudo, como um dos cenários, uma situação de expansão do aeroporto Amerigo Vespucci, sendo que nesta hipótese o empreendimento em questão chegaria a um total de 46.525 movimentações, o que representa um montante 10,44% inferior ao considerado no inventário do Aeroporto da Pampulha para o ano de 2015 (51.948). No que tange ao ciclo LTO, que representa a maior fonte contribuidora em seu estudo, os autores adotaram para o CO uma taxa de emissão igual a 70,09 ton.ano⁻¹, inferior ao considerado no inventário da FEAM e, conseqüentemente, no presente estudo no que se refere ao ciclo LTO (85,512 ton.ano⁻¹). Já no que se refere ao SO_x, foi adotada pelos autores uma taxa de emissão igual a 9,29 ton.ano⁻¹, também superior ao considerado no presente estudo (4,494 ton.ano⁻¹), ao passo que os autores consideraram uma taxa de emissão de MP₁₀ igual a 0,87 ton.ano⁻¹, sendo que o presente estudo adotou uma taxa de 0,866 to ton.ano⁻¹. Já para o NO_x os autores consideraram uma taxa de 109,09 ton.ano⁻¹, superior, portanto, ao adotado no presente estudo (32,262 ton.ano⁻¹).

Avaliando em especial o NO_x, em função de seu potencial de impacto e por ser um poluente reconhecidamente emitido em aeroportos, o que é corroborado pelos resultados a serem apresentados por meio dos capítulos 5.4 e 5.5, observou-se que, tal como Simonetti, Maltagliati e Manfrida (2015), outros estudos consideraram taxas

de emissão ainda maiores aos que constam no inventário publicado pela FEAM, os quais foram adotados no presente trabalho. Por meio da Tabela 13 são apresentados os números de ciclos LTO e respectivas taxas de emissão de NO_x utilizados em outros estudos em aeroportos.

Tabela 13 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos de outros aeroportos (tonelada.ano⁻¹)

Aeroporto	País	Ciclo LTO	NO_x	Referência
Rome Fiumicino	Itália	298.233	1.844,2	Martini, Scotti e Volta (2013)
Hong Kong	China	210.500	7.235,3	Li <i>et al.</i> (2020)
Shenzhen	China	170.193	2.716,2	Li <i>et al.</i> (2020)
Milan Malpensa	Itália	164.745	1.250,7	Martini, Scotti e Volta (2013)
Zhuhai	China	37.347	469,0	Li <i>et al.</i> (2020)
Tbilisi	Georgia	19.005	247,3	Tokuslu (2020)
Kayseri	Turquia	7.887	102,6	Yilmaz (2017)

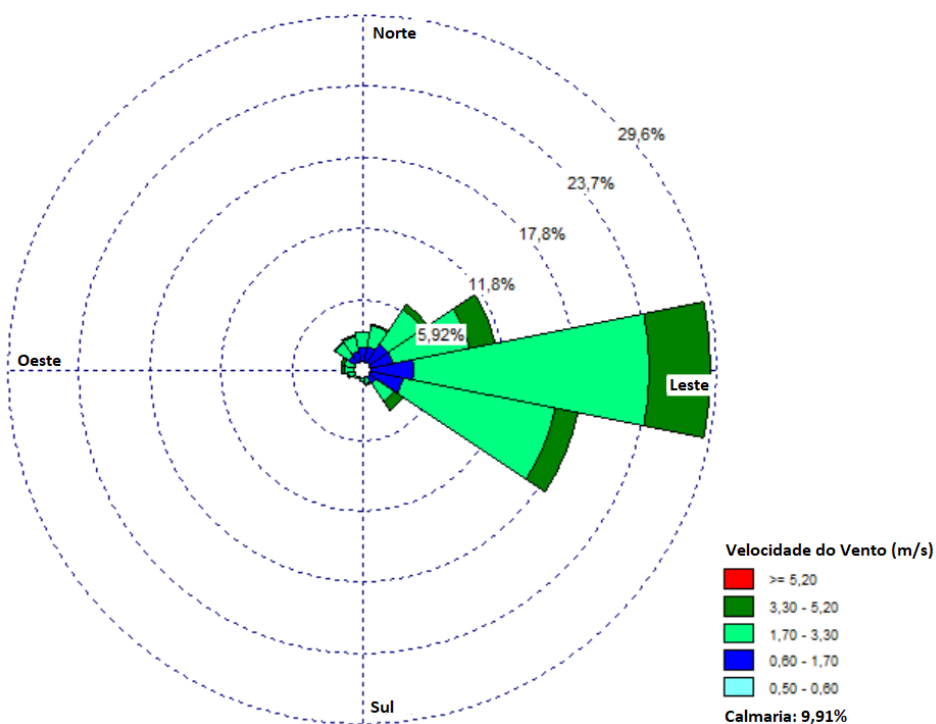
Diante do exposto, sugere-se que, em continuidade ao presente trabalho, seja realizada uma atualização do inventário de emissões do Aeroporto da Pampulha, perpassando o mapeamento e quantificação *in situ* das taxas de emissão, de modo que possam ser mais fidedignas às atuais operações do empreendimento e correspondam ao presente contexto do aeroporto.

5.2. Pré-Processamento Meteorológico

Foi realizado o pré-processamento meteorológico utilizando o AERMET View™, por meio do qual foi possível obter a rosa dos ventos para a área de estudo, considerando, para tanto, os dados da estação A521 do INMET ao longo do período de 01/01/2015 a 31/12/2015, conforme apresentado na Tabela 5.

Neste sentido, por meio da Figura 11 é apresentada a rosa dos ventos consolidada para todo o ano de 2015, sendo que as pétalas das rosas dos ventos indicam a origem dos ventos.

Figura 11 – Rosa dos Ventos da Estação A521 do INMET, contemplando o período de 01/01/2015 a 31/12/2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado anteriormente (Figura 11), observou-se que os ventos predominantes para o ano de 2015 foram de origem leste, em linha, portanto, à normal climatológica do período de 1991 a 2020 referente à predominância anual dos ventos, que também possui ventos de mesma origem. Além disso, também foi constatado para o ano de 2015 contribuições de ventos com origem lés-sudeste e lés-nordeste. Neste sentido, considerando de forma isolada a dinâmica dos ventos sob uma perspectiva anual, espera-se que os poluentes atmosféricos emitidos no Aeroporto da Pampulha tendam a se dispersar em grande parte no sentido oeste deste aeroporto, com dispersões também ocorrendo no sentido oés-noroeste e oés-sudoeste.

Na sequência, por meio da Figura 12 à Figura 23, pode ser constatada a ocorrência de variações quanto à origem dos ventos ao longo dos meses de 2015, sendo observada, de maneira geral, a predominância das mesmas origens de ventos mencionadas anteriormente. Destaca-se que as pétalas das rosas dos ventos indicam a origem dos ventos.

Figura 12 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, janeiro de 2015

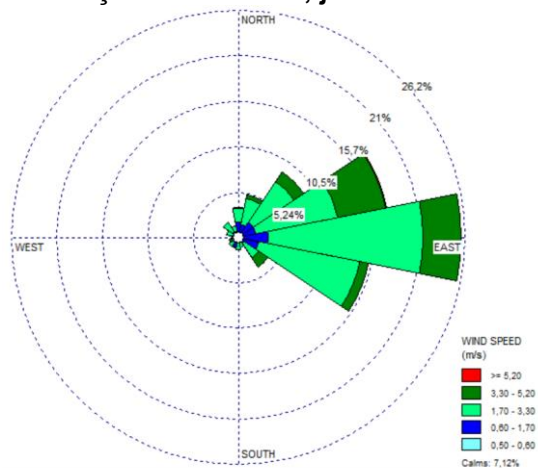


Figura 13 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, fevereiro de 2015

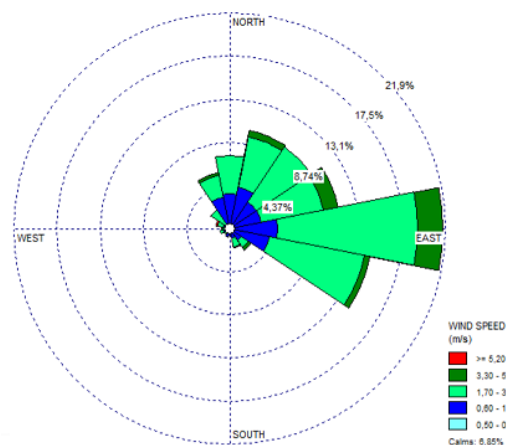


Figura 14 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, março de 2015

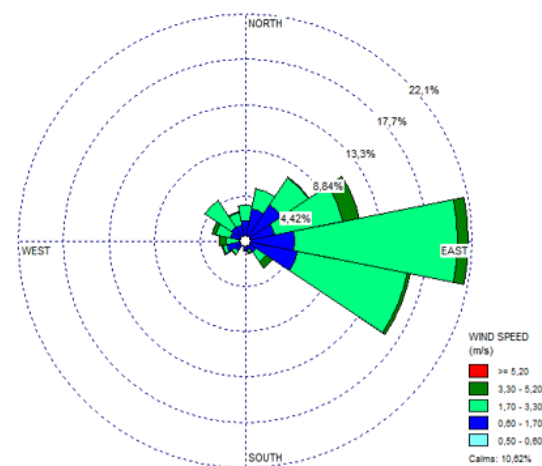


Figura 15 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, abril de 2015

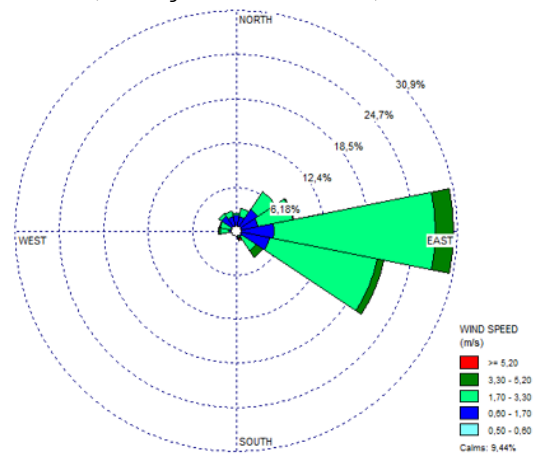


Figura 16 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, maio de 2015

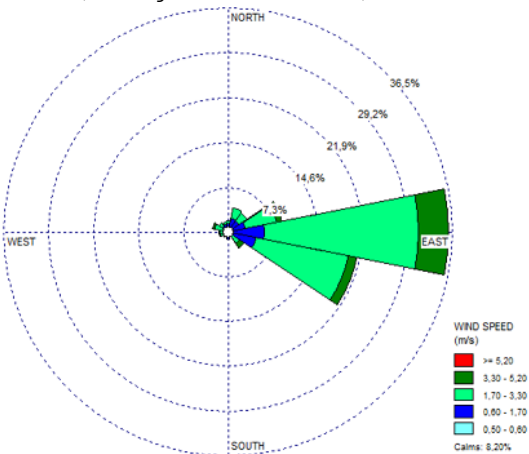


Figura 17 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, junho de 2015

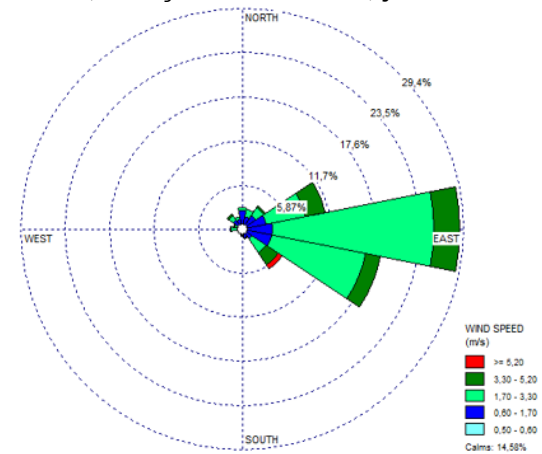


Figura 18 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, julho de 2015

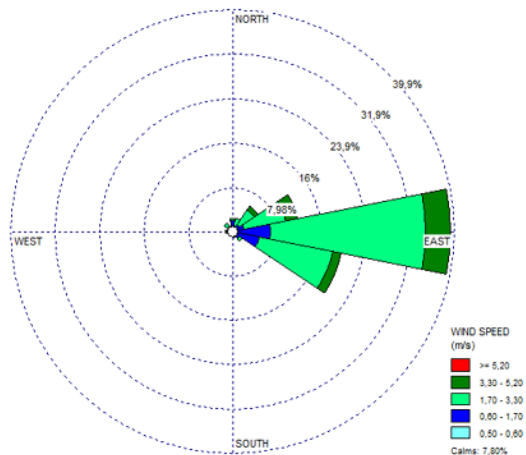


Figura 19 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, agosto de 2015

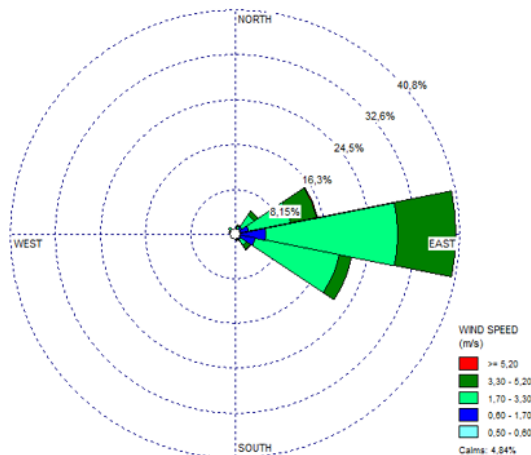


Figura 20 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, setembro de 2015

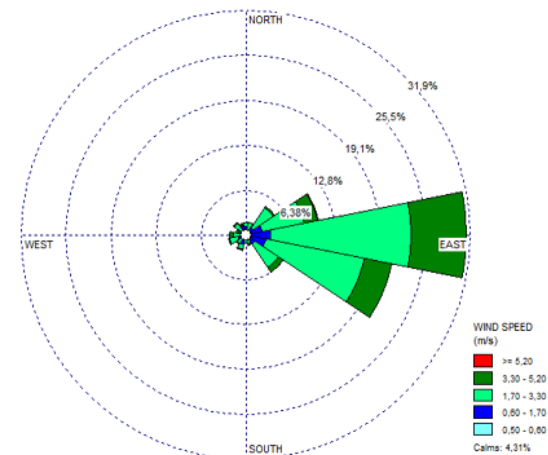


Figura 21 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, outubro de 2015

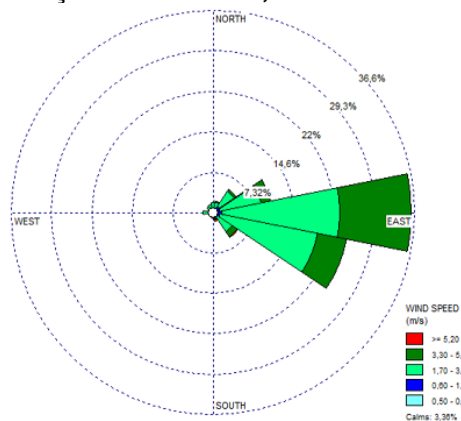


Figura 22 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, novembro de 2015

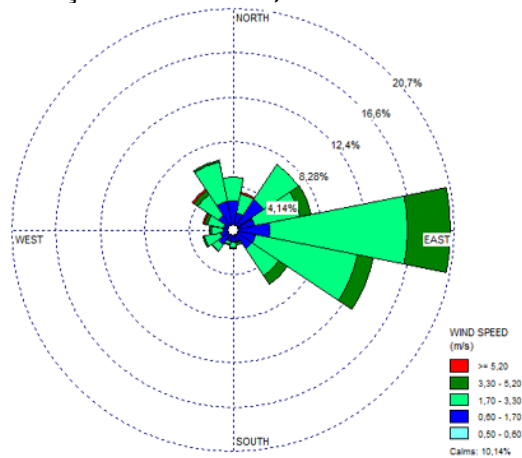
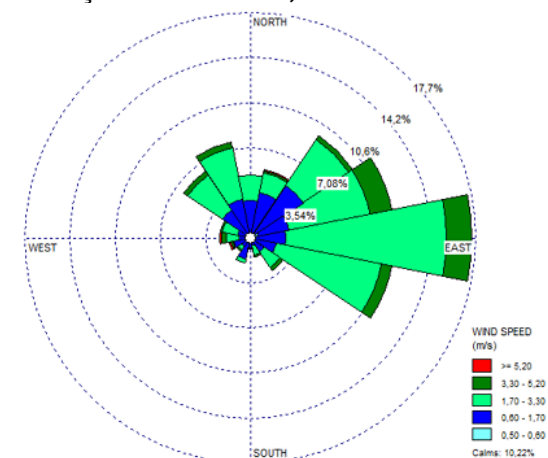
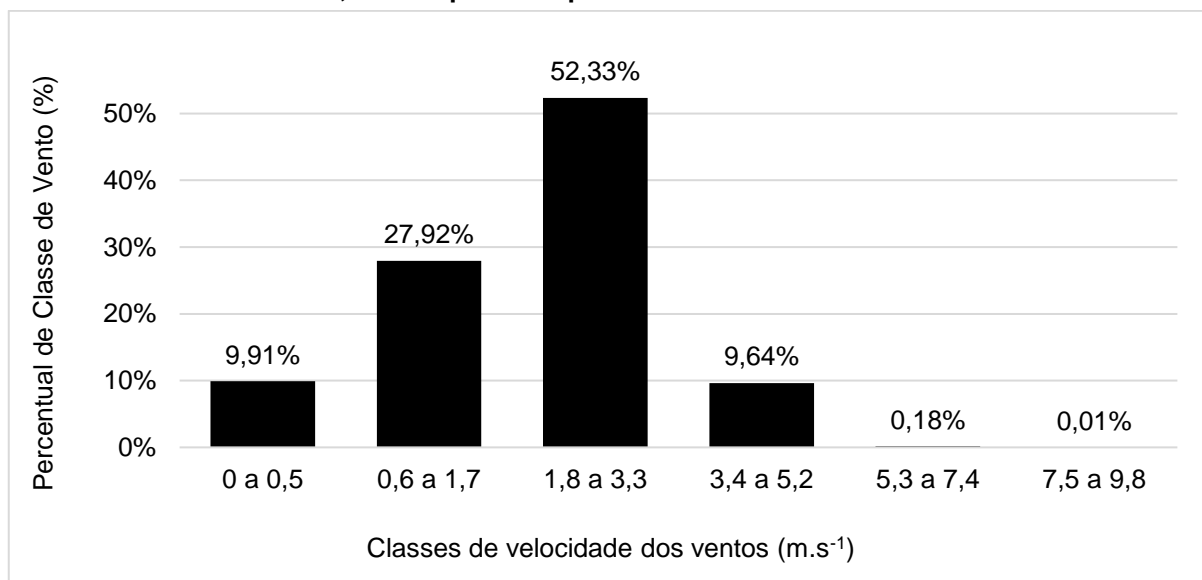


Figura 23 – Rosa dos ventos Rosa dos Ventos, Estação INMET A521, dezembro de 2015



Por meio da Figura 24 é apresentada a distribuição da frequência de velocidade dos ventos obtida com base nas velocidades registradas em 2015 na Estação A521 do INMET.

Figura 24 – Distribuição da frequência de velocidade dos ventos registrados na Estação A521 do INMET, contemplando o período de 01/01/2015 a 31/12/2015



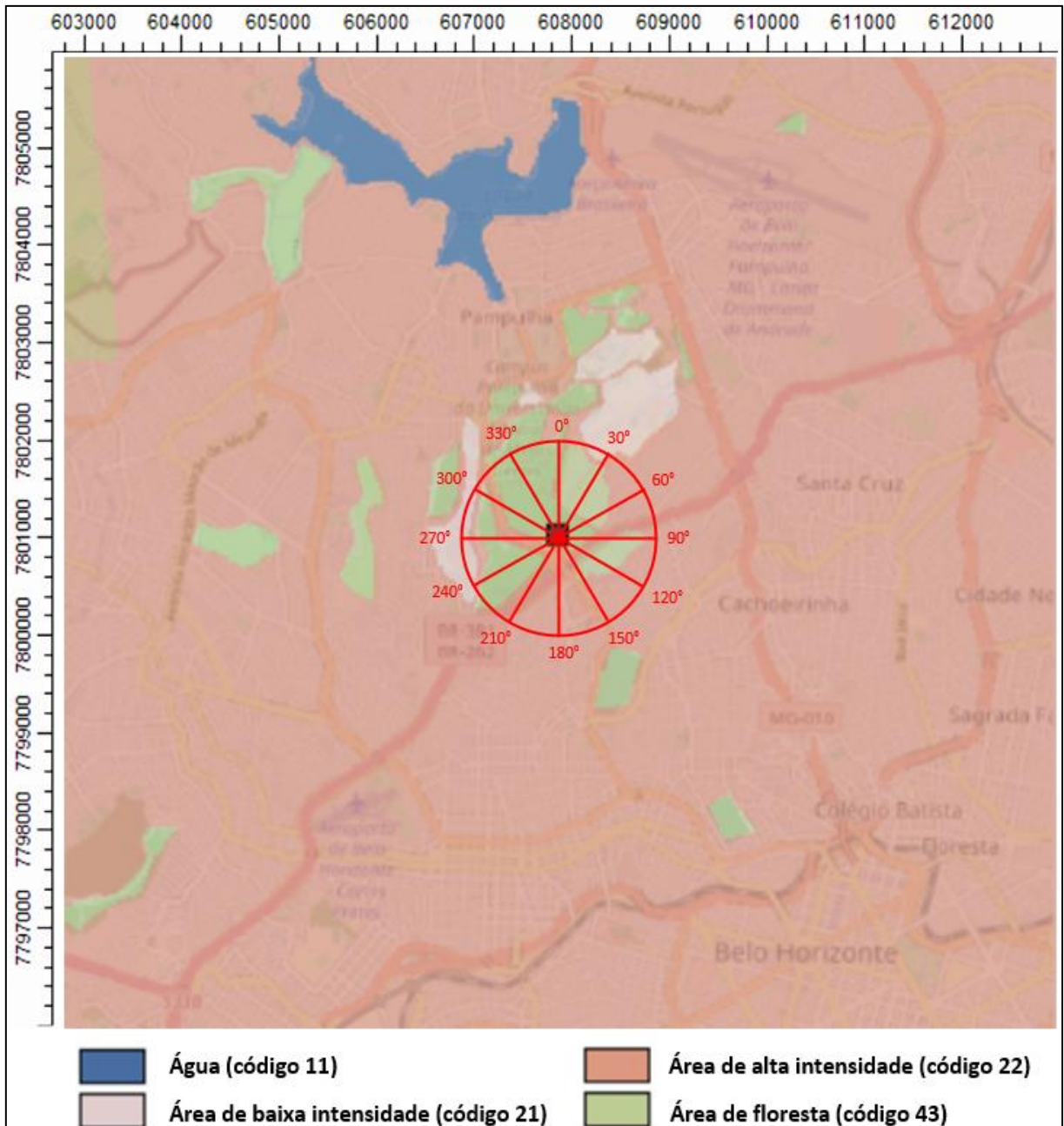
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Figura 24, foram registrados ao longo de 2015 ventos com velocidades superiores aos registrados na normal climatológica do período de 1991 a 2020 referente à intensidade média mensal dos ventos ($1,54 \text{ m.s}^{-1}$). Foi observado que em 2015 um total de 9,91% dos ventos registrados na estação A521 do INMET estavam associados a velocidades inferiores a $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, o que, segundo Escala de Beaufort (TABATCHEIK, 2023), representam ventos na condição de calmaria. Também foi constatado que 27,92% dos ventos tiveram velocidade variando entre $0,60 \text{ m.s}^{-1}$ e $1,70 \text{ m.s}^{-1}$, sendo estes caracterizados, segundo a Escala de Beaufort, como de bafagem. Um total de 52,33% dos ventos, que representa a maioria dos registros, foi associado a velocidades entre $1,8 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,3 \text{ m.s}^{-1}$, sendo classificados como ventos de aragem segundo a Escala de Beaufort, em que é possível senti-los no rosto e que possuem potencial para movimentar folhas das árvores. Cabe ainda destacar que 9,64% dos ventos se enquadraram entre velocidades de $3,4 \text{ m.s}^{-1}$ a $5,2 \text{ m.s}^{-1}$, sendo este intervalo designado como de ventos fracos segundo a supracitada Escala, com potencial de agitar folhas das árvores. Foi ainda observado que 0,18%

dos ventos estiveram associados a velocidades que variaram de $5,3 \text{ m.s}^{-1}$ a $7,4 \text{ m.s}^{-1}$, sendo este intervalo representado por ventos na condição moderada, em que pode haver levantamento de poeira e pequenos papéis, além da agitação de galhos de árvores, conforme Escala de Beaufort. Por fim, 0,01% dos ventos tiveram velocidade inserida no intervalo entre $7,5 \text{ m.s}^{-1}$ e $9,8 \text{ m.s}^{-1}$, sendo este percentual caracterizado por um único dado, igual a $7,9 \text{ m.s}^{-1}$, o maior dentre os registrados, representando, segundo a Escala de Beaufort, a condição de vento fresco, com possibilidade de implicar na movimentação de pequenas árvores.

Por meio da ferramenta *Land Use Creator*, parte integrante do AERMET View™, foram definidas as classes de uso do solo para a região abrangida pela área de domínio do modelo, chegando-se à composição apresentada na Figura 25. Foram definidas quatro classes de uso do solo, sendo seus nomes apresentados conforme padronização pré-existente no AERMET View™, a saber: **i)** água, cujo código na ferramenta *Land Use Creator* é o de número 11, representando a Lagoa da Pampulha; **ii)** área de baixa intensidade, cujo código na ferramenta *Land Use Creator* é o de número 21; **iii)** área de alta intensidade, cujo código na ferramenta *Land Use Creator* é o de número 22; e **iv)** área de floresta, cujo código na ferramenta *Land Use Creator* é o de número 43. Por meio da Figura 25 pode ainda ser observado o raio de 1 quilômetro considerado em relação à estação meteorológica da Pampulha (A521), bem como a divisão dos 12 setores para a caracterização do solo, sendo que o setor 1 corresponde à faixa de 0° a 30° , o setor 2 à faixa de 30° a 60° , o setor 3 à faixa de 60° a 90° , o setor 4 à faixa de 90° a 120° , o setor 5 à faixa de 120° a 150° , o setor 6 à faixa de 150° a 180° , o setor 7 à faixa de 180° a 210° , o setor 8 à faixa de 210° a 240° , o setor 9 à faixa de 240° a 270° , o setor 10 à faixa de 270° a 300° , o setor 11 à faixa de 300° a 330° e o setor 12 à faixa de 330° a 360° (0°).

Figura 25 – Classes de uso do solo definidas por meio da ferramenta *Land Use Creator*, parte integrante do AERMET View™



Por meio da Tabela 14 são apresentados os valores utilizados para os parâmetros albedo, razão de *Bowen* e rugosidade da superfície, os quais foram definidos por meio do AERMET View™, considerando as características de uso e ocupação do solo da região.

Tabela 14 – Valores utilizados de albedo, razão de *Bowen* e rugosidade da superfície

Mês	Albedo ¹	Razão de <i>Bowen</i> ¹	Rugosidade da Superfície Por Setor											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Janeiro	0,16	0,73	0,96	0,62	0,33	0,51	0,36	0,14	0,15	0,60	0,34	0,52	1,03	1,13
Fevereiro	0,16	0,73	0,96	0,62	0,33	0,51	0,36	0,14	0,15	0,60	0,34	0,52	1,03	1,13
Março	0,16	0,95	0,94	0,60	0,31	0,49	0,34	0,13	0,14	0,60	0,32	0,50	1,02	1,12
Abril	0,16	0,95	0,94	0,60	0,31	0,49	0,34	0,13	0,14	0,60	0,32	0,50	1,02	1,12
Mai	0,16	0,95	0,94	0,60	0,31	0,49	0,34	0,13	0,14	0,60	0,32	0,50	1,02	1,12
Junho	0,18	0,95	0,66	0,43	0,23	0,35	0,25	0,10	0,11	0,41	0,23	0,35	0,72	0,78
Julho	0,18	0,95	0,66	0,43	0,23	0,35	0,25	0,10	0,11	0,41	0,23	0,35	0,72	0,78
Agosto	0,18	0,95	0,66	0,43	0,23	0,35	0,25	0,10	0,11	0,41	0,23	0,35	0,72	0,78
Setembro	0,16	0,75	0,81	0,53	0,29	0,44	0,31	0,13	0,13	0,51	0,29	0,45	0,88	0,96
Outubro	0,16	0,75	0,81	0,53	0,29	0,44	0,31	0,13	0,13	0,51	0,29	0,45	0,88	0,96
Novembro	0,16	0,75	0,81	0,53	0,29	0,44	0,31	0,13	0,13	0,51	0,29	0,45	0,88	0,96
Dezembro	0,16	0,73	0,96	0,62	0,33	0,51	0,36	0,14	0,15	0,60	0,34	0,52	1,03	1,13

¹Igual para todas as 12 seções da Figura 25.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3. Teste de Grade do Domínio da Modelagem de Dispersão Atmosférica

Conforme previsto no capítulo 4.3.1, foi realizado um teste simulando quatro distintas configurações de grade (ID 01, ID 02, ID 03 e ID 04) no AERMOD View™, de modo a se avaliar a influência da utilização de uma grade menos refinada ou mais refinada na modelagem da dispersão atmosférica. A seguir, são apresentadas as isolinhas de concentração e respectivas grades associadas às configurações ID 01 (Figura 26 e Figura 27), ID 02 (Figura 28 e Figura 29), ID 03 (Figura 30 e Figura 31) e ID 04 (Figura 32 e Figura 33).

Figura 26 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 01, NO₂ (24 horas)

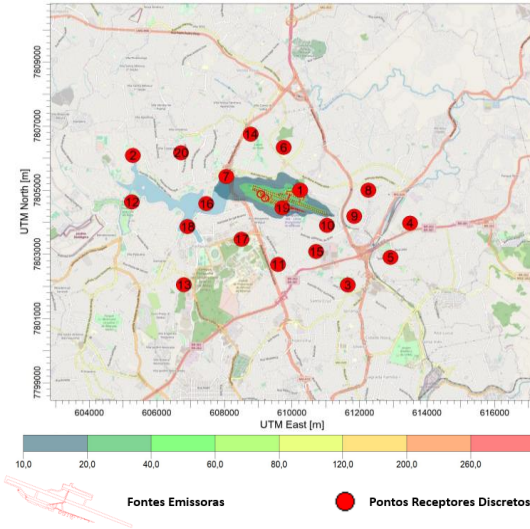


Figura 27 – Grade da Configuração ID 01, NO₂ (24 horas)

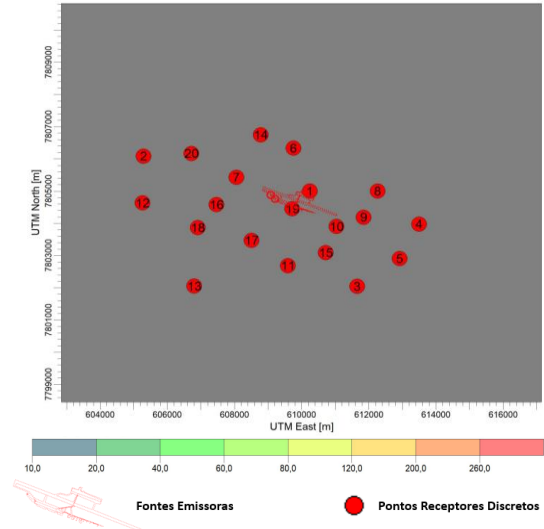


Figura 28 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 02, NO₂ (24 horas)

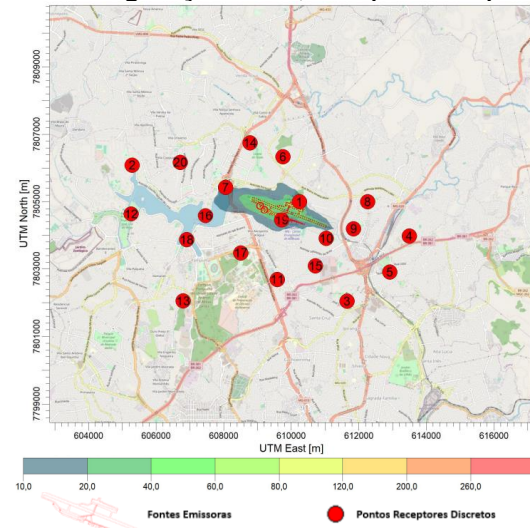


Figura 29 – Grade da Configuração ID 02, NO₂ (24 horas)

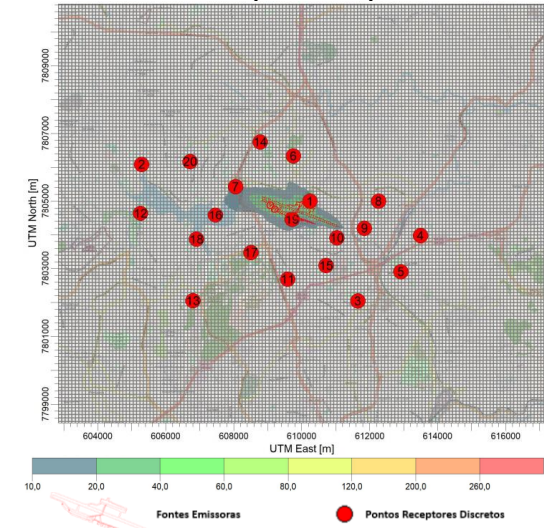


Figura 30 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 03, NO₂ (24 horas)

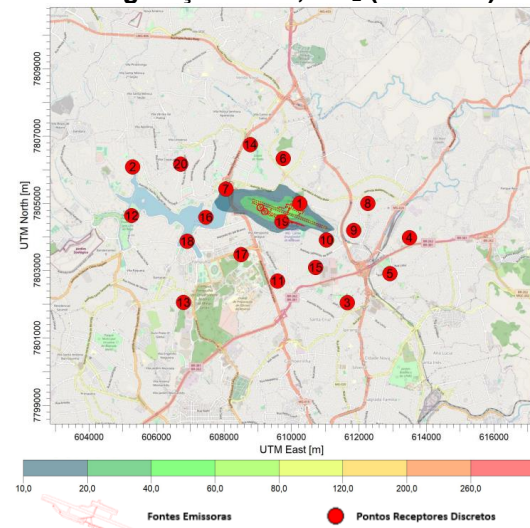


Figura 31 – Grade da Configuração ID 03, NO₂ (24 horas)

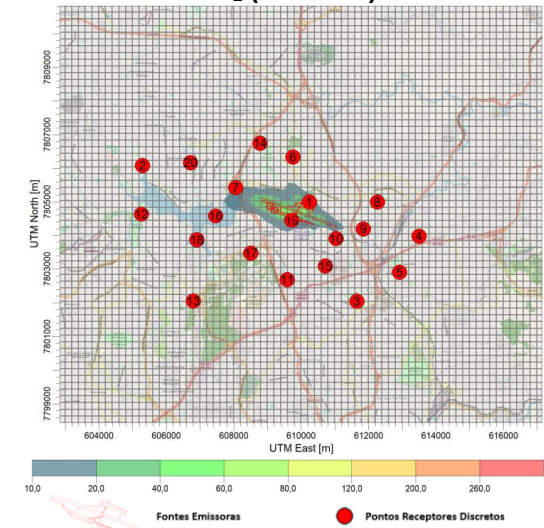


Figura 32 – Isolinha de Concentração da Configuração ID 04, NO₂ (24 horas)

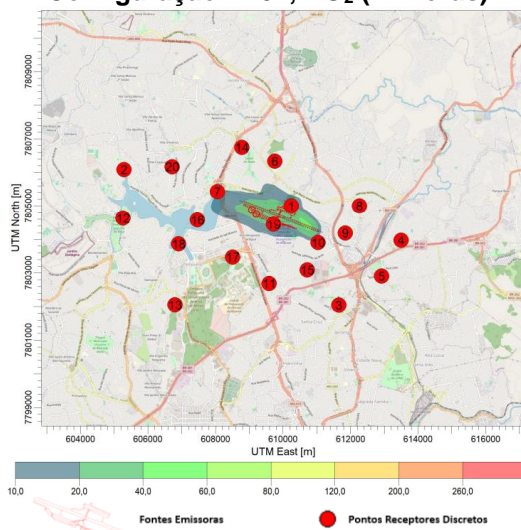
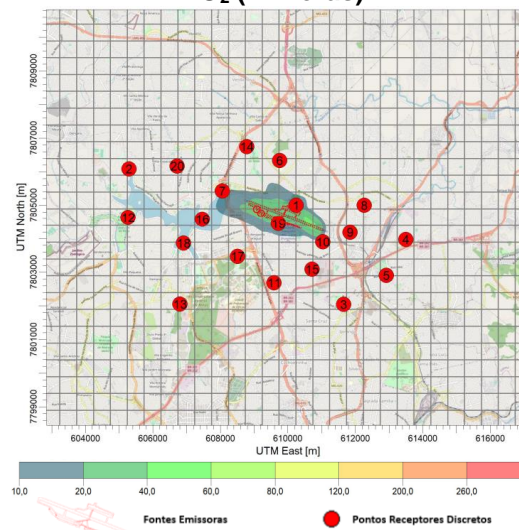


Figura 33 – Grade da Configuração ID 04, NO₂ (24 horas)



Conforme já apresentado na Tabela 6, a configuração ID 01 representa a grade mais refinada dentre as configurações previstas, seguida pela ID 02, que consiste na segunda mais refinada, ao passo que a configuração ID 03 é a terceira mais refinada e a ID 04 a menos refinada.

Observou-se que os resultados quantitativos modelados para os pontos receptores discretos (PRD's) em cada uma das quatro configurações foram iguais entre si, ou seja, as concentrações para cada PRD não variaram em função da utilização de uma grade mais ou menos refinada. Tal condição pode ser justificada pelo fato de que, como os pontos receptores discretos possuem coordenadas geográficas previamente definidas pelo usuário em quaisquer configurações utilizadas de grade, mudanças de espaçamento e/ou número de células não implicam na alteração das coordenadas dos PRD's ou de qualquer outra configuração da modelagem que impacte no cálculo da concentração modelada para estes pontos, o que, por consequência, não altera a concentração modelada nos pontos receptores discretos.

Por outro lado, considerando tão somente os pontos receptores cartesianos (pontos receptores de grade), observou-se que as máximas concentrações obtidas em cada configuração variaram de uma configuração para outra. Isso pode ser justificado pelo fato de que os pontos de grade consistem em pontos de cruzamento das linhas de grade do modelo, ou seja, ao se alterar o espaçamento e/ou o número de células da grade da modelagem, o ponto de cruzamento das linhas e colunas que compõem a

grade do modelo sofrem alteração, implicando tanto na modificação dos pontos de cruzamento entre as linhas e colunas da grade, quanto também resultando em uma grade mais adensada (mais refinada) ou menos adensada (menos refinada), o que, por consequência, faz com que o modelo estime a concentração de um dado poluente com maior ou menor nível de refino. Para a configuração ID 01, a mais refinada dentre as quatro previstas, a máxima concentração obtida de NO₂ (24 horas) em todo o domínio modelado, considerando, portanto, os PRD's e todos os pontos de grade, foi de 81,013 µg.m⁻³ (no ponto de longitude 609167 e latitude 7804748, 23 K), ao passo que para o ID 02 foi igual a 74,964 µg.m⁻³ (no ponto de longitude 609342 e latitude 7804693, 23 K), para o ID 03 foi de 69,128 µg.m⁻³ (no ponto de longitude 610192 e latitude 7804843, 23 K) e para o ID 04, o menos refinado, igual a 51,102 µg.m⁻³ (no ponto de longitude 610742 e latitude 7804393, 23 K). Constata-se, portanto, que quanto mais refinada foi a grade maior foi a máxima concentração obtida considerando todo o domínio. Assim, ao se ter como referência para comparação a máxima concentração modelada no domínio da configuração ID 01, observou-se que o ID 02 apresentou concentração máxima 7% inferior à obtida no ID 01, que o ID 03 apresentou concentração máxima 15% inferior à obtida no ID 01 e que o ID 04 apresentou concentração máxima 37% inferior à obtida no ID 01.

Além disso, conforme apresentado por meio da Figura 26 à Figura 33, também foi observado que as isolinhas de concentração de cada uma das quatro configurações apresentaram dispersões suavemente diferentes entre si. As variações tanto nas máximas concentrações modeladas em cada configuração quanto na dispersão das isolinhas de concentração estão diretamente associadas às características consideradas em cada configuração da grade, uma vez que, como reflexo de cada configuração, para a grade mais refinada (ID 01) foram utilizados 250.000 receptores de grade, para a configuração ID 02 um total de 22.500, para o ID 03 um montante de 5.625 e para a menos refinada (ID 04) um total de 900 receptores de grade.

Embora o tempo de processamento demandado para modelar um poluente (NO₂) na configuração menos refinada tenha sido consideravelmente inferior ao tempo de processamento do cenário mais refinado, importante ressaltar que houve uma diferença de 37% entre a máxima concentração modelada em todo o domínio da grade mais refinada (ID 01) e a máxima concentração modelada em todo o domínio da grade

menos refinada (ID 04), motivo pelo qual, também considerando as diferenças na dispersão das plumas, utilizou-se a grade mais refinada para as modelagens do “cenário 2015” e “cenário 2015 + 50%”. Diante do exposto, sugere-se que para outros trabalhos similares, sobretudo para aqueles em que se faz necessária a obtenção das concentrações máximas de toda a área do domínio, seja considerada a possibilidade de utilização de grades mais refinadas quando da modelagem da dispersão atmosférica.

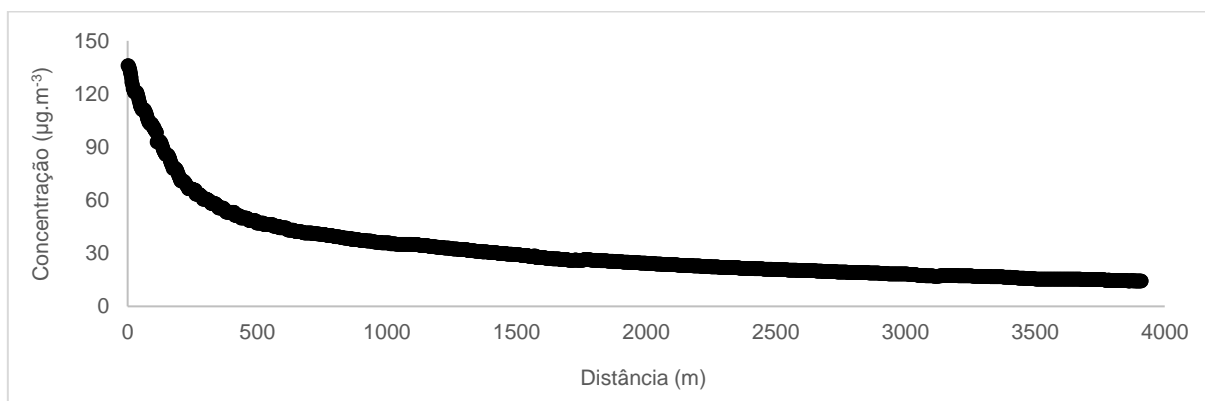
5.4. Modelagem da Dispersão Atmosférica (“cenário 2015”)

Utilizando o AERMOD View™ foi possível modelar o “cenário 2015”, o qual considerou a modelagem de PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), MP_{2,5} (24 horas e anual), NO₂ (1 hora, 24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual) e CO (8 horas e 24 horas), tendo como base as taxas de emissão disponibilizadas no inventário da FEAM, as quais referem-se ao ano de 2015. Importante mencionar que, considerando os resultados obtidos no capítulo 5.3, foi adotada a configuração de grade ID 01 da Tabela 6. Os resultados obtidos a partir deste cenário podem dar indícios da dinâmica da dispersão atmosférica no entorno do Aeroporto da Pampulha em outros anos que apresentem comportamento similar a 2015 em termos operacionais (consumo de combustível, número de movimentações aeroportuárias e taxas de emissão de poluentes atmosféricos), meteorológicos e demais premissas adotadas na modelagem realizada no presente trabalho.

Cabe mencionar que as maiores concentrações dos poluentes modelados, considerando o domínio como um todo (pontos receptores discretos e pontos de grade), foram observadas dentro do Aeroporto da Pampulha, conforme detalhado na Tabela 15. Tal constatação, que já era prevista, justifica-se pelo fato certo de que as fontes emissoras consideradas no modelo se encontram no interior do empreendimento, sendo que à medida em que se tem um distanciamento em relação a estas fontes tem-se um decaimento das concentrações dos poluentes. Tal fato é corroborado pela Figura 34, que ilustra o decaimento das concentrações de NO₂ (“cenário 2015”) para o período de referência de 1 hora em função do distanciamento da fonte, considerando, neste caso, o distanciamento entre um ponto localizado no interior do aeroporto (longitude 609167 e latitude 7804748, 23 K) e o PRD 12

(longitude 605257 e latitude 7804636, 23 K), localizado na região oeste da Lagoa da Pampulha, em que foi observada uma diminuição gradativa de $136 \mu\text{g.m}^{-3}$ para $14,3 \mu\text{g.m}^{-3}$, respectivamente.

Figura 34 – Decaimento das concentrações de NO_2 (“cenário 2015”), período de referência de 1 hora, considerando como local de origem um ponto no interior do Aeroporto da Pampulha e como local final o PRD 12



Por meio da Tabela 15 são apresentadas as maiores concentrações modeladas para cada poluente no “cenário 2015”, considerando o domínio como um todo, ou seja, abrangendo os pontos receptores discretos e os pontos de grade.

Tabela 15 – Máximas concentrações modeladas em todo o domínio (cenário 2015)

Parâmetro	Período de Referência	Resultado Máximo Modelado em Todo o Domínio	Ponto Receptor	
			Longitude	Latitude
$\text{PTS} (\mu\text{g.m}^{-3})$	24h	1,694	610742	7804393
	Anual	1,021	610742	7804393
$\text{MP}_{10} (\mu\text{g.m}^{-3})$	24h	1,672	610742	7804393
	Anual	1,008	610742	7804393
$\text{MP}_{2,5} (\mu\text{g.m}^{-3})$	24h	1,581	610742	7804393
	Anual	0,953	610742	7804393
$\text{NO}_2 (\mu\text{g.m}^{-3})$	1h	137,784	609137	7804778
	24h	81,013	609167	7804748
	Anual	74,924	609977	7804868
$\text{SO}_2 (\mu\text{g.m}^{-3})$	24h	8,485	610742	7804393
	Anual	5,199	610742	7804393
CO (ppm)	8h	0,267	610742	7804393
CO (mg.m^{-3})	24h	0,165	610742	7804393

Com base na Tabela 15 observou-se que os resultados de CO (8 horas e 24 horas), NO_2 (1 hora), SO_2 (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP_{10} (24 horas e anual) e $\text{MP}_{2,5}$ (24 horas e anual) estiveram em conformidade com os limites dos padrões

intermediários e finais previstos na Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023, bem como abaixo dos valores guia estabelecidos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS. As exceções foram observadas para concentrações associadas aos períodos de referência de 24 horas e anual do poluente NO₂, as quais apresentaram para a área interna do Aeroporto da Pampulha: **i)** concentrações (81,013 µg.m⁻³) para o período de referência de 24 horas superiores ao padrão interino 2 (50 µg.m⁻³) e ao nível guia de qualidade do ar (25 µg.m⁻³) previstos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS; e **ii)** concentrações (74,924 µg.m⁻³) para o período de referência anual superiores ao padrão interino 1 (40 µg.m⁻³), padrão interino 2 (30 µg.m⁻³), padrão interino 3 (20 µg.m⁻³) e nível guia de qualidade do ar (µg.m⁻³) previstos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS, bem como ao padrão intermediário 1 (60 µg.m⁻³), padrão intermediário 2 (50 µg.m⁻³), padrão intermediário 3 (45 µg.m⁻³) e padrão final (40 µg.m⁻³) da Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023.

Cabe mencionar que, tal como já comentado, Simonetti, Maltagliati e Manfrida (2015) avaliaram a dinâmica da dispersão de poluentes atmosféricos no Aeroporto Amerigo Vespucci, em Florença, Itália, utilizando o AERMOD, considerando como um dos cenários uma situação de expansão do aeroporto, sendo que nesta hipótese o aeroporto em questão chegaria a um total de 46.525 movimentações, o que representa um montante 10,44% inferior ao considerado no inventário do Aeroporto da Pampulha para o ano de 2015 (51.948). Neste cenário, os autores avaliaram a dispersão dos poluentes CO (8 horas), SO₂ (anual), MP₁₀ (24 horas e anual) e NO₂ (anual). Observou-se que o máximo resultado de CO (8 horas) obtido pelos autores (0,218 ppm) em toda a grade modelada foi similar ao máximo resultado obtido no presente estudo (0,267 ppm). Já a máxima concentração modelada de SO₂ (anual) obtida pelos autores ficou na faixa abrangida pelo intervalo de 1 a 3 µg.m⁻³, o que também representa um resultado próximo ao obtido no presente estudo (5,199 µg.m⁻³). A máxima concentração modelada de MP₁₀ (24 horas) obtida pelos autores permaneceu no intervalo de 6 a 12 µg.m⁻³, superior à máxima concentração modelada no presente estudo (1,672 µg.m⁻³), ao passo que a máxima concentração de MP₁₀ (anual) obtida pelos autores ficou na faixa abrangida pelo intervalo de 1,5 a 2,5 µg.m⁻³, superior, portanto, ao obtido no presente trabalho (1,008 µg.m⁻³). Por fim, observou-se que, no que tange ao NO₂ (anual), os autores obtiveram máxima concentração

enquadrada no intervalo entre 30 e 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ao passo que no presente estudo foi constatada uma concentração máxima de 74,924 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

De modo a ilustrar as dispersões modeladas no “cenário 2015” para cada parâmetro, são apresentadas a seguir as isolinhas (“plumas”) de cada poluente. As isolinhas de concentração referentes ao parâmetro PTS são apresentadas por meio da Figura 35 e da Figura 36, as quais referem-se, respectivamente, aos resultados deste poluente associados aos períodos de referência de 24 horas e anual. Já as isolinhas de concentração referentes ao MP_{10} são evidenciadas por meio da Figura 37 e da Figura 38, estando associadas, respectivamente, aos resultados deste poluente para os períodos de referência de 24 horas e anual. As isolinhas de concentração relacionadas ao $\text{MP}_{2,5}$ são apresentadas por meio da Figura 39 e da Figura 40, referindo-se, respectivamente, aos resultados deste poluente associados aos períodos de referência de 24 horas e anual. Quanto ao NO_2 , suas isolinhas de concentração são elucidadas por meio da Figura 41, Figura 42 e Figura 43, as quais referem-se, respectivamente, aos resultados deste poluente associados aos períodos de referência de 1 hora, 24 horas e anual. Já as isolinhas de concentração referentes ao SO_2 são apresentadas por meio da Figura 44 e da Figura 45, sendo que estas estão relacionadas, respectivamente, aos resultados deste poluente para os períodos de referência de 24 horas e anual. Por fim, as isolinhas de concentração referentes ao CO são apresentadas por meio da Figura 46 e da Figura 47, as quais referem-se, respectivamente, aos resultados deste poluente para os períodos de referência de 8 horas e 24 horas.

Figura 35 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015)

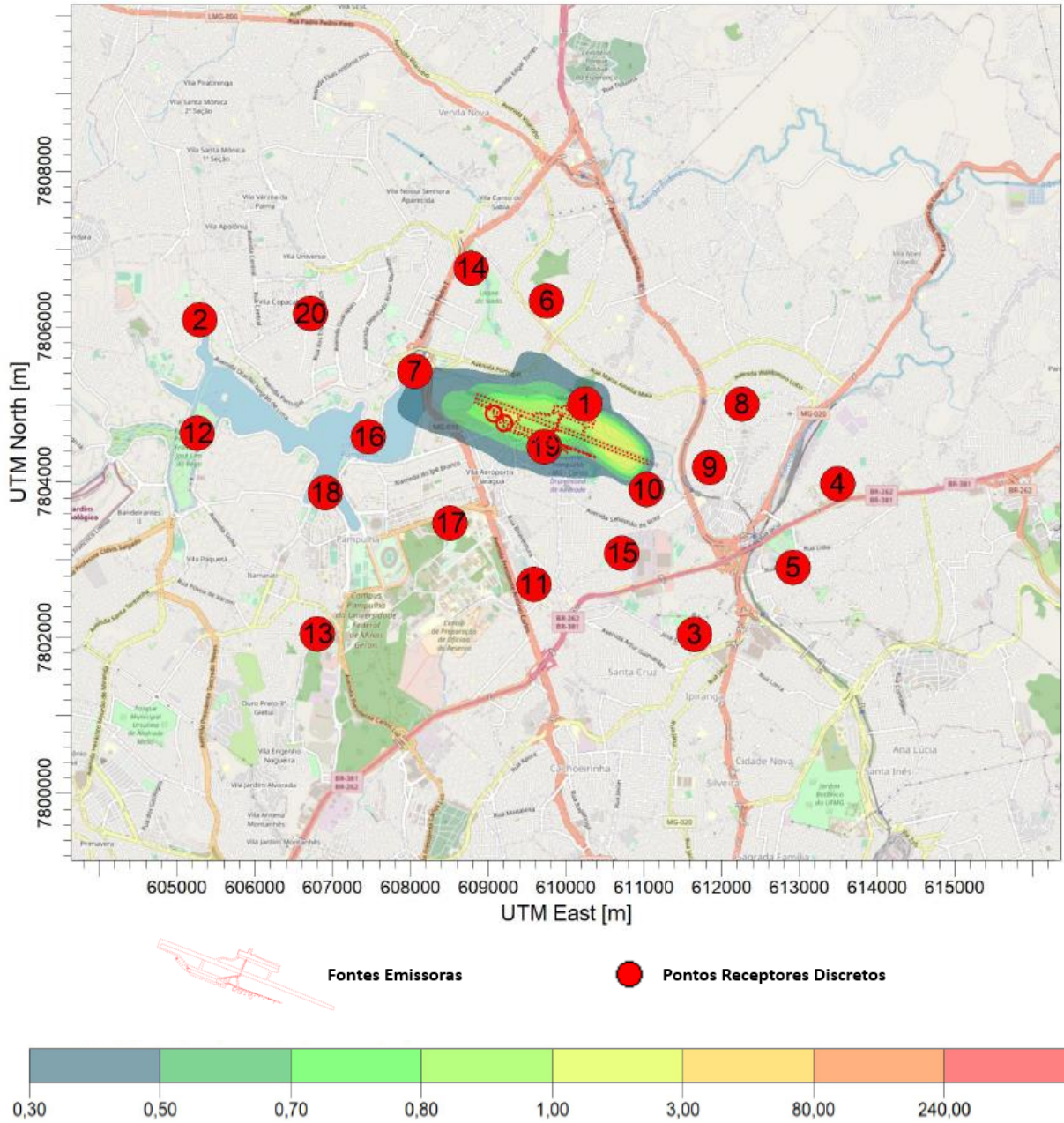


Figura 36 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência anual), estando os resultados expressos em $\mu\text{g.m}^{-3}$ (cenário 2015)

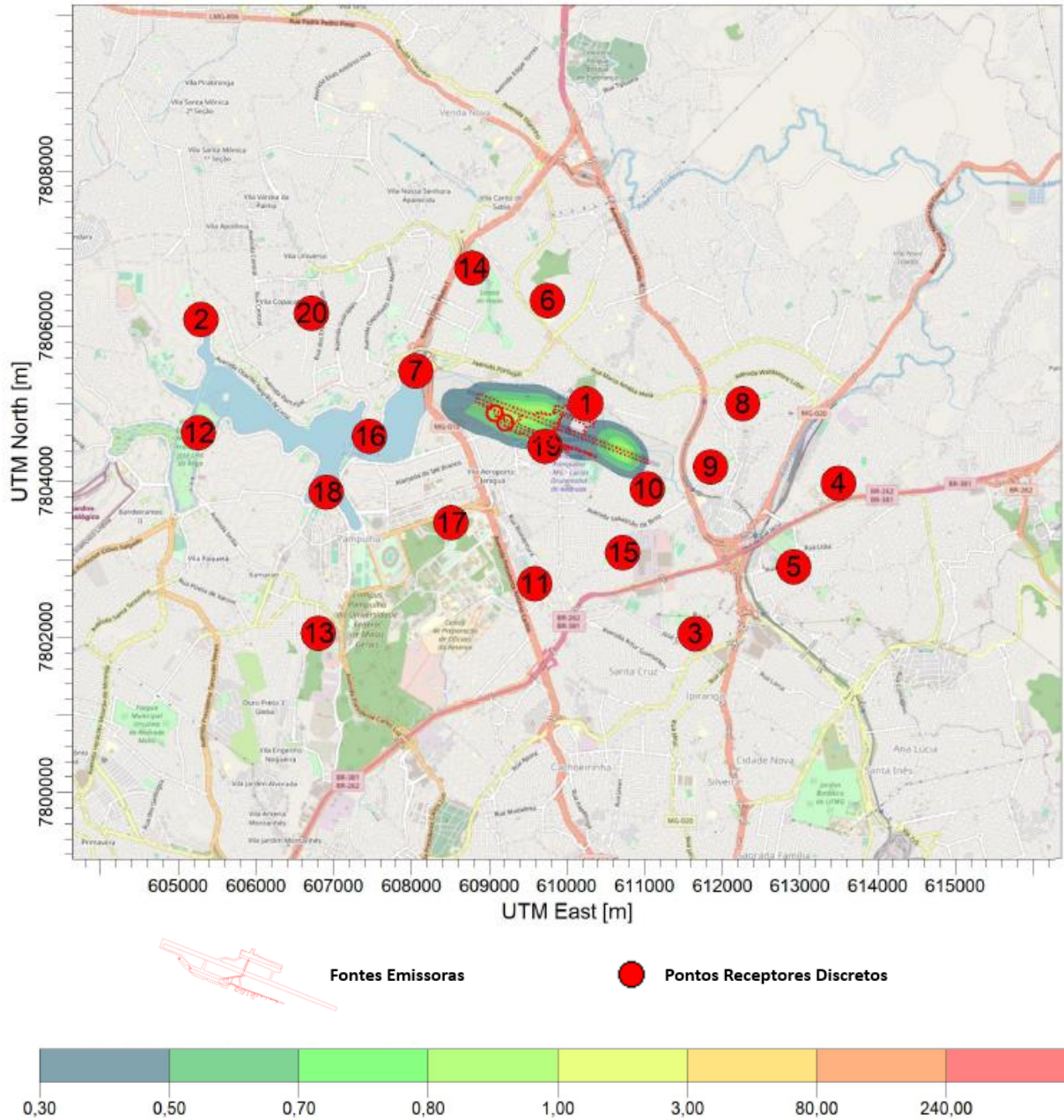


Figura 37 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP₁₀ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015)

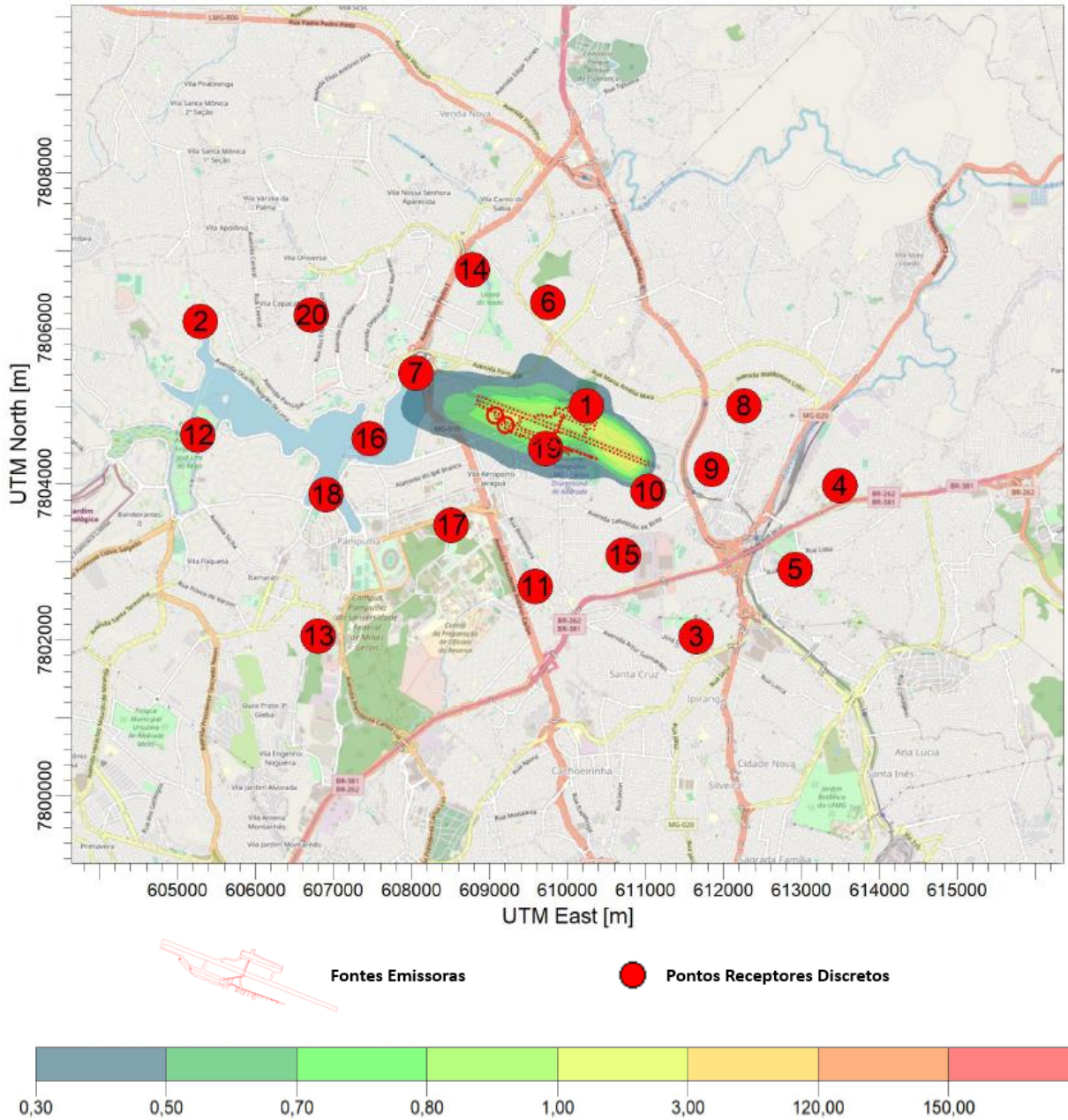


Figura 38 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP₁₀ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015)

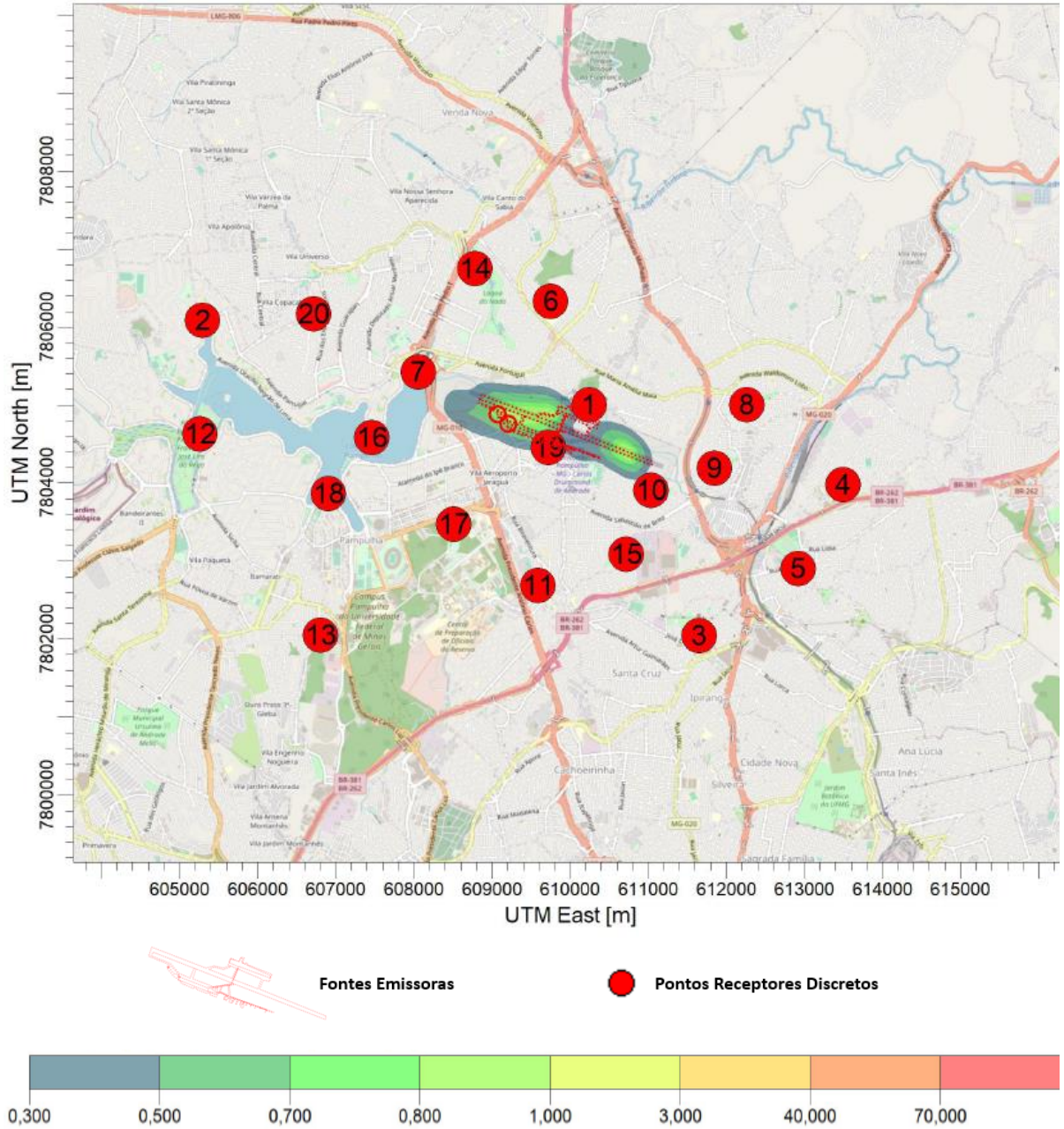


Figura 39 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de $MP_{2,5}$ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu g \cdot m^{-3}$ (cenário 2015)

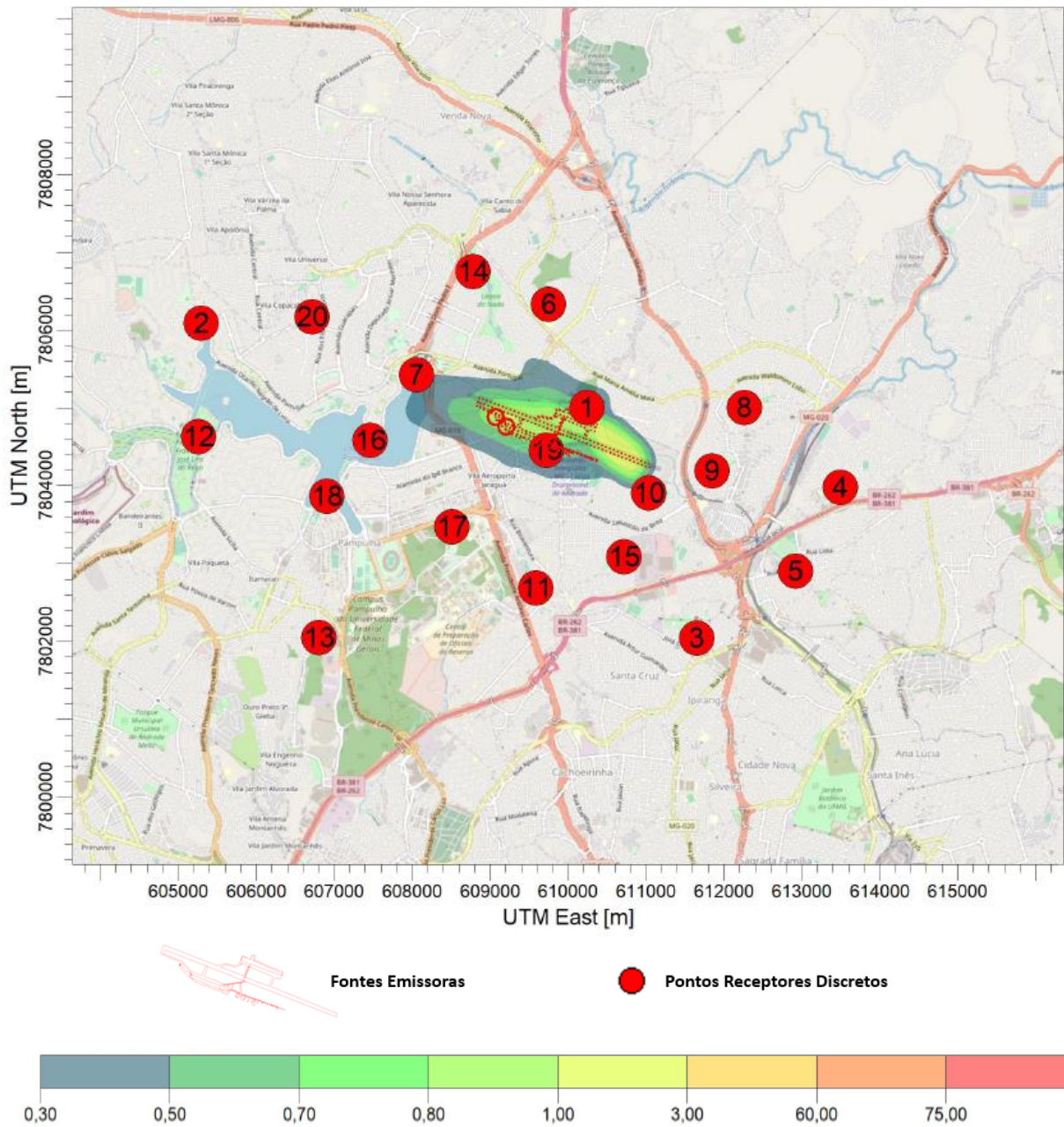


Figura 40 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de $MP_{2,5}$ (período de referência anual), estando os resultados expressos em $\mu g.m^{-3}$ (cenário 2015)

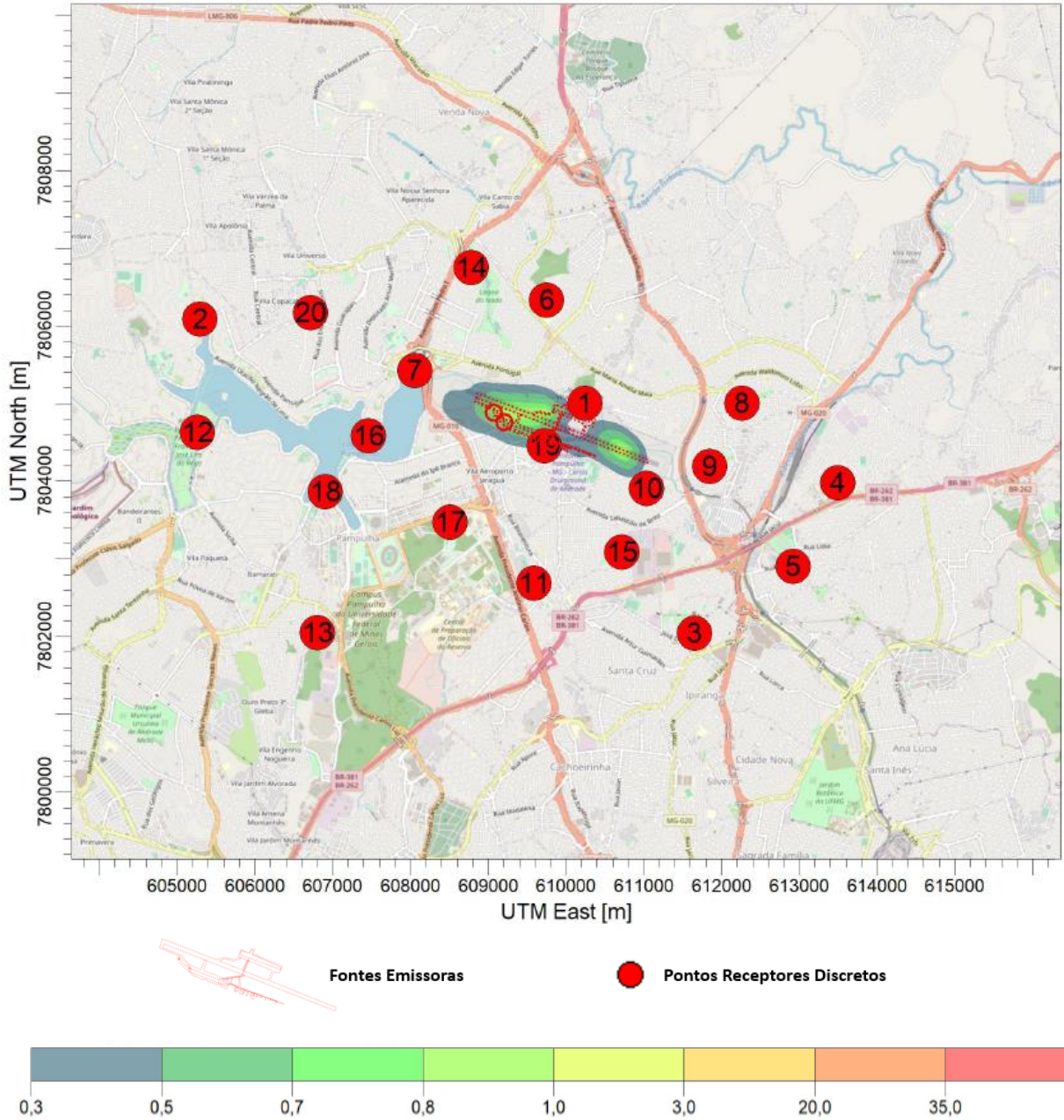


Figura 41 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO₂ (período de referência de 1 hora), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015)

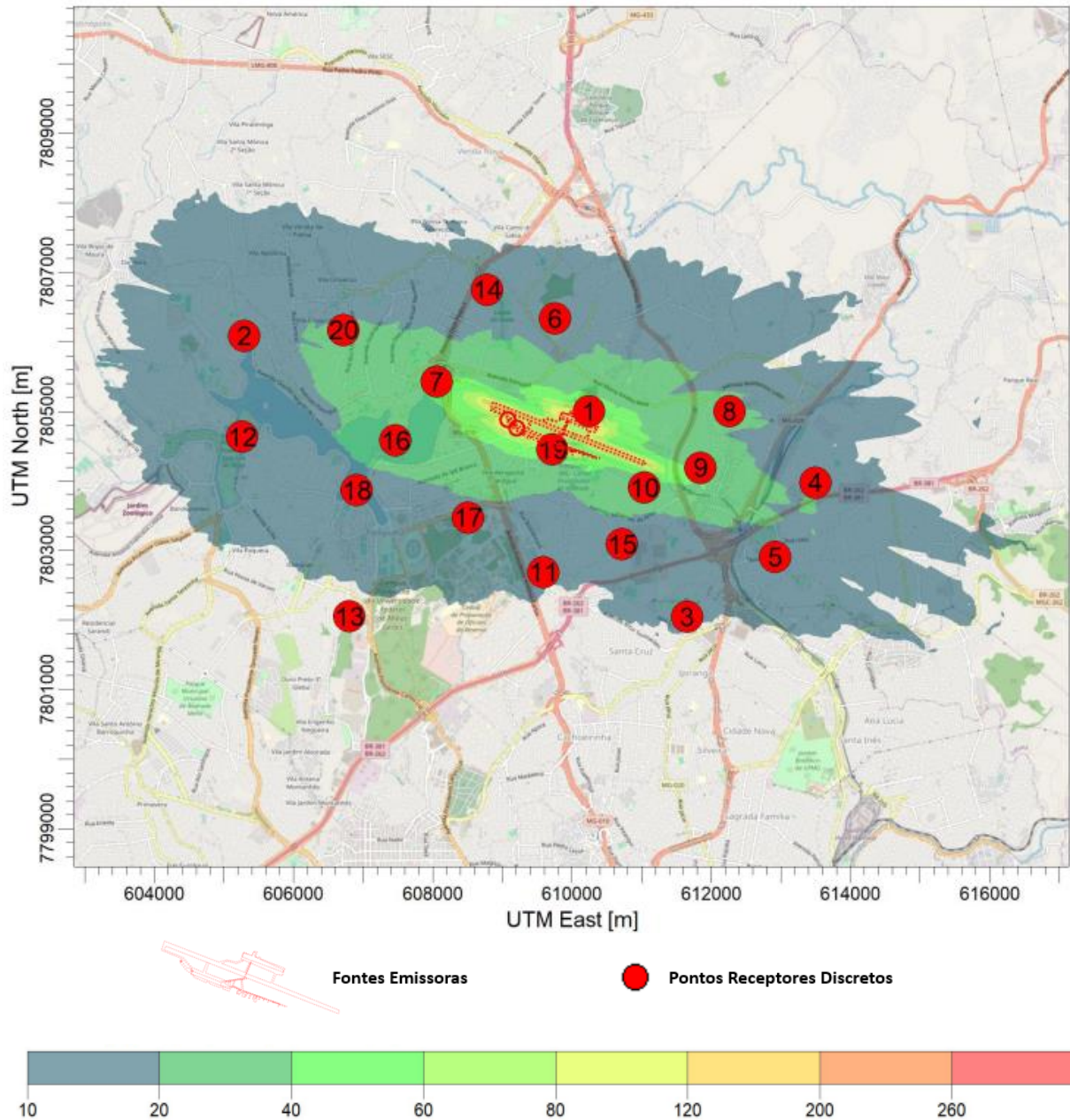


Figura 42 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015)

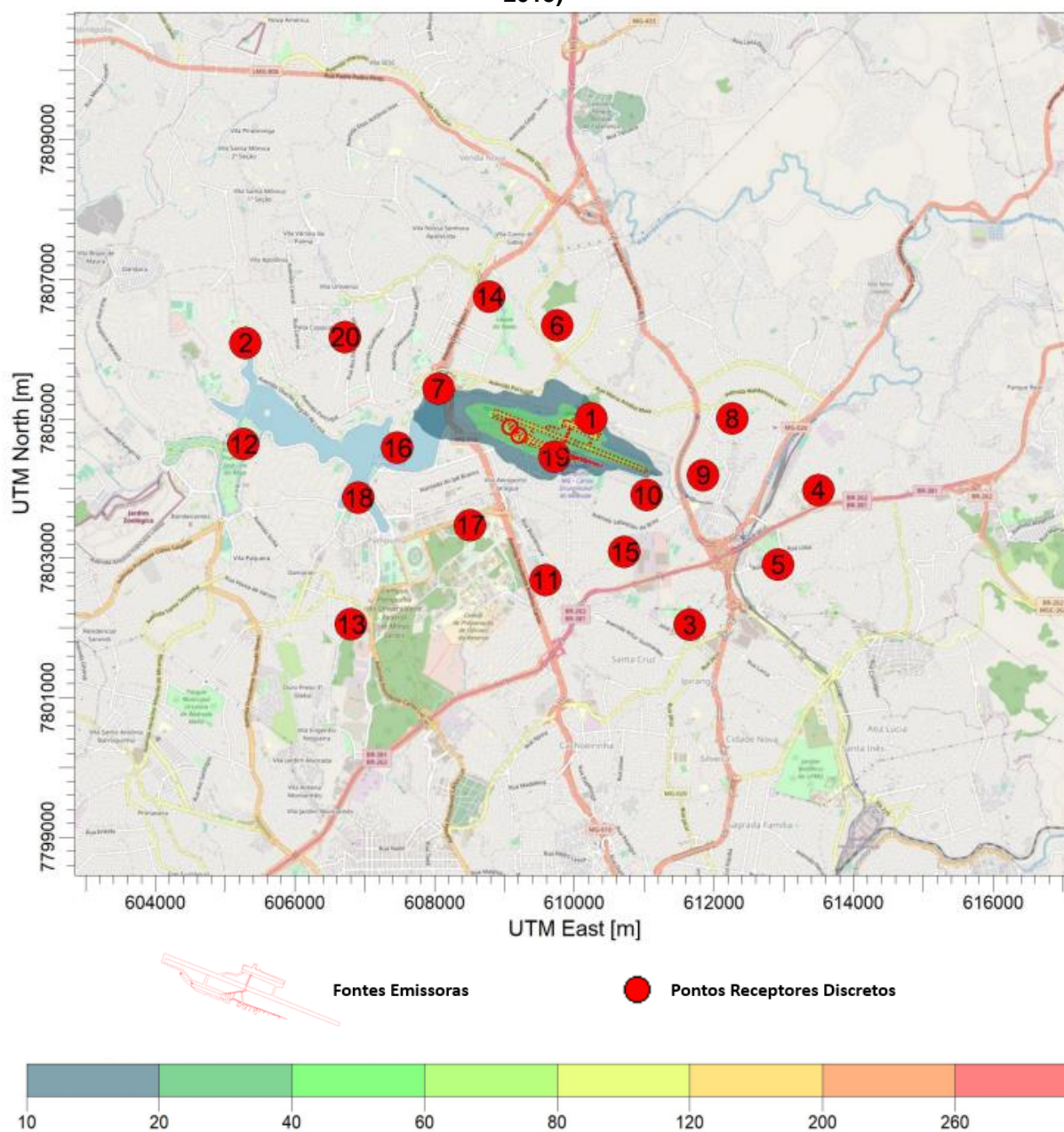


Figura 43 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em $\mu\text{g.m}^{-3}$ (cenário 2015)

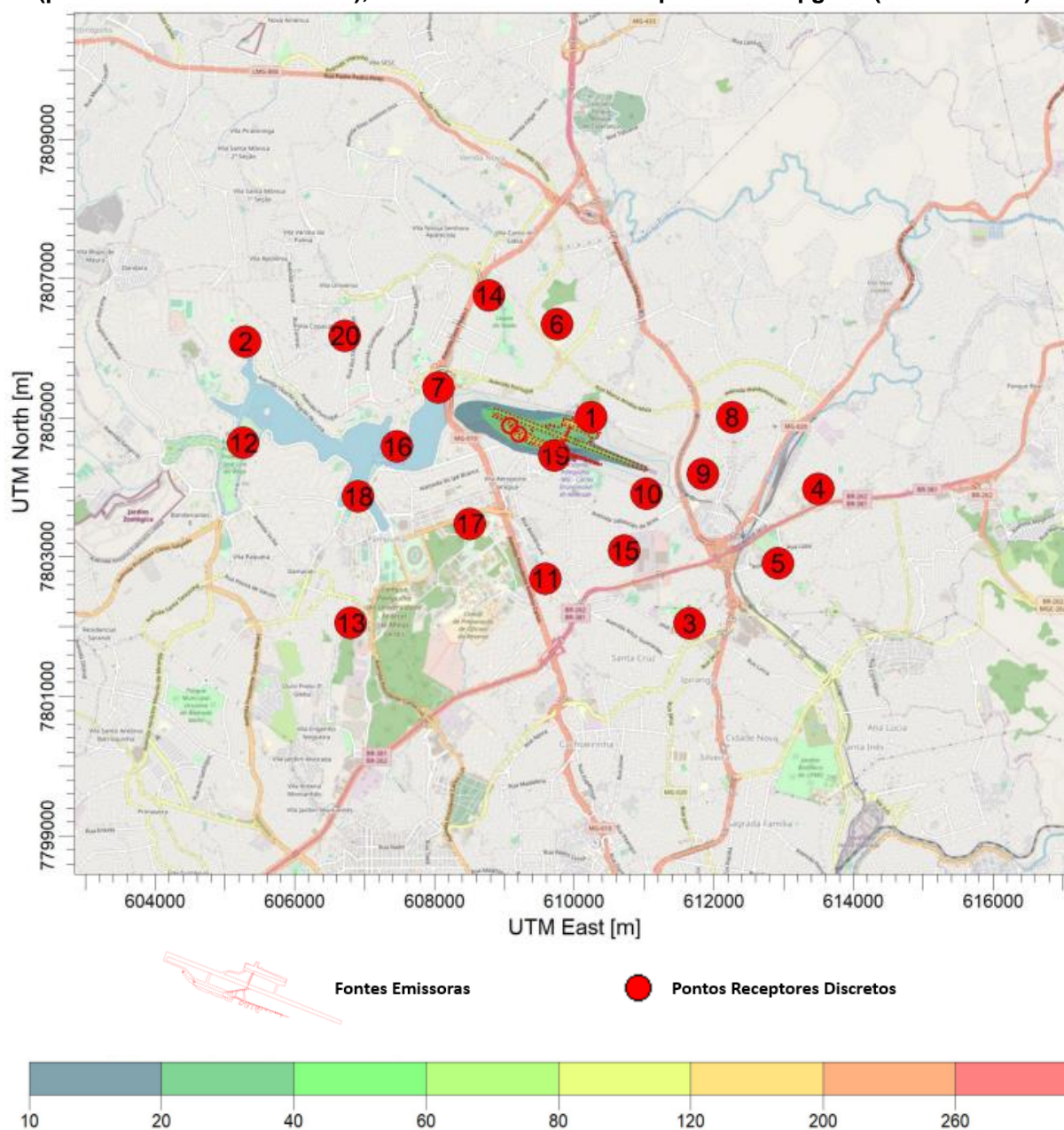


Figura 44 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015)

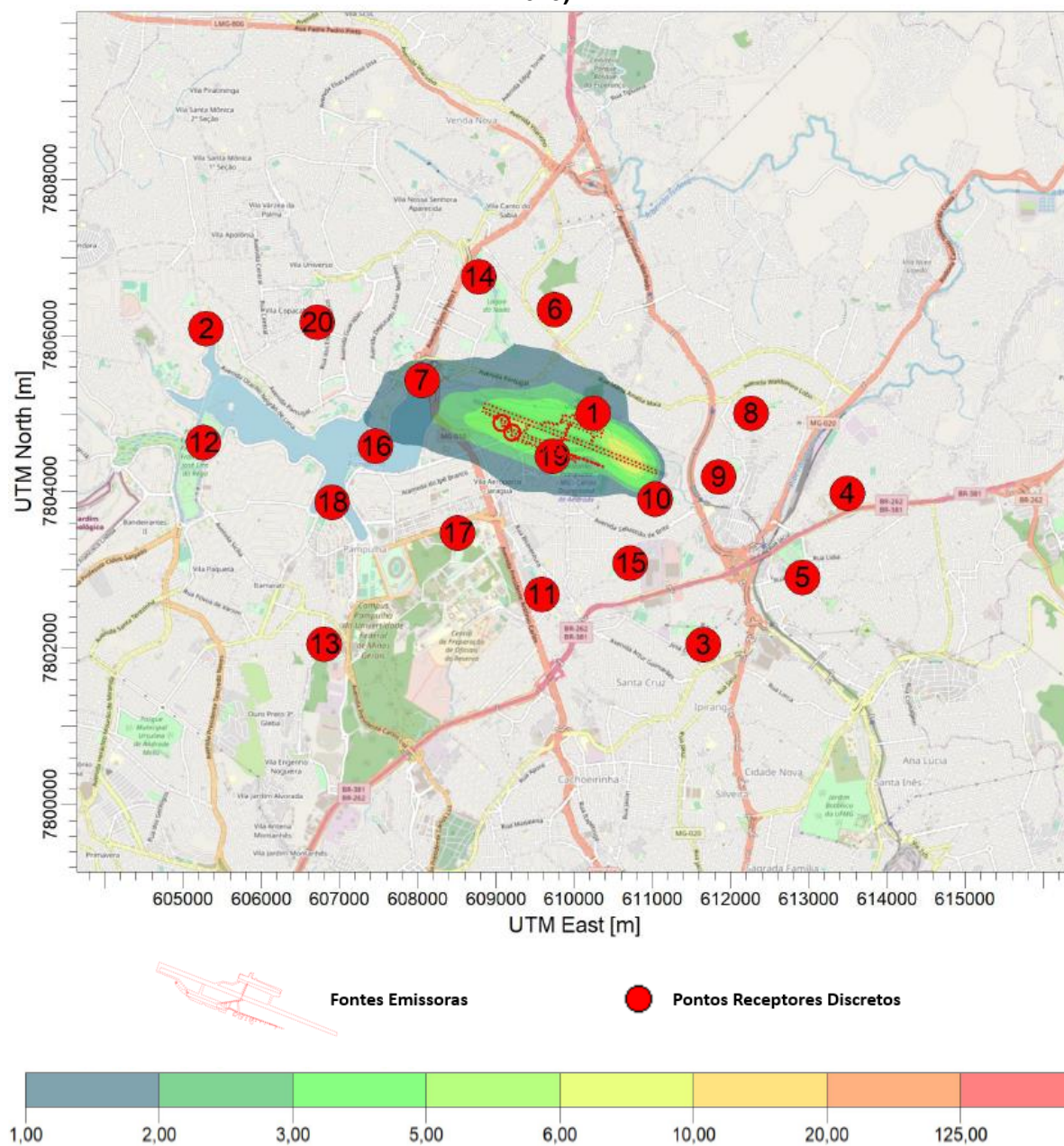


Figura 45 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015)

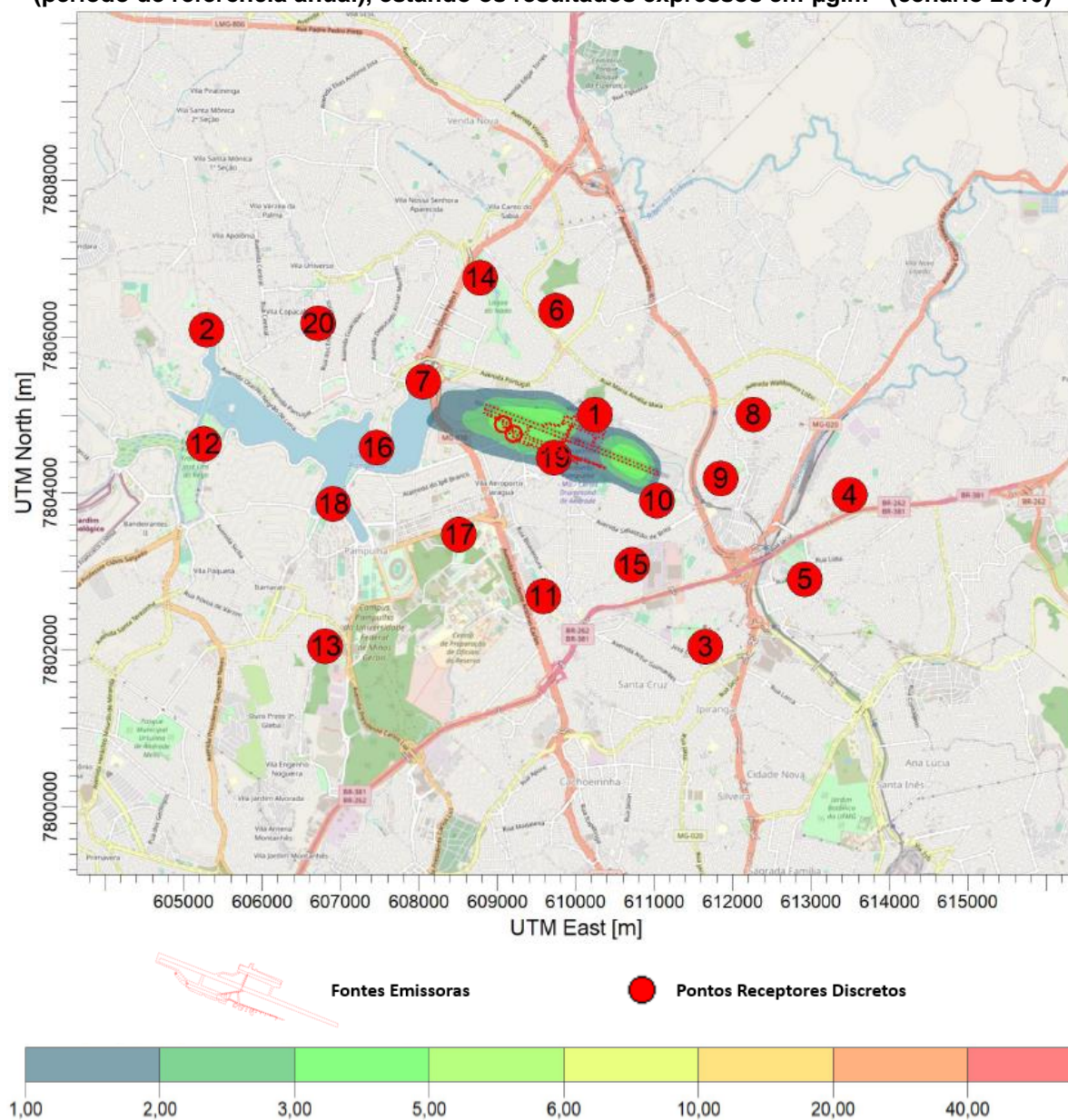


Figura 46 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 8 horas), estando os resultados expressos em ppm (cenário 2015)

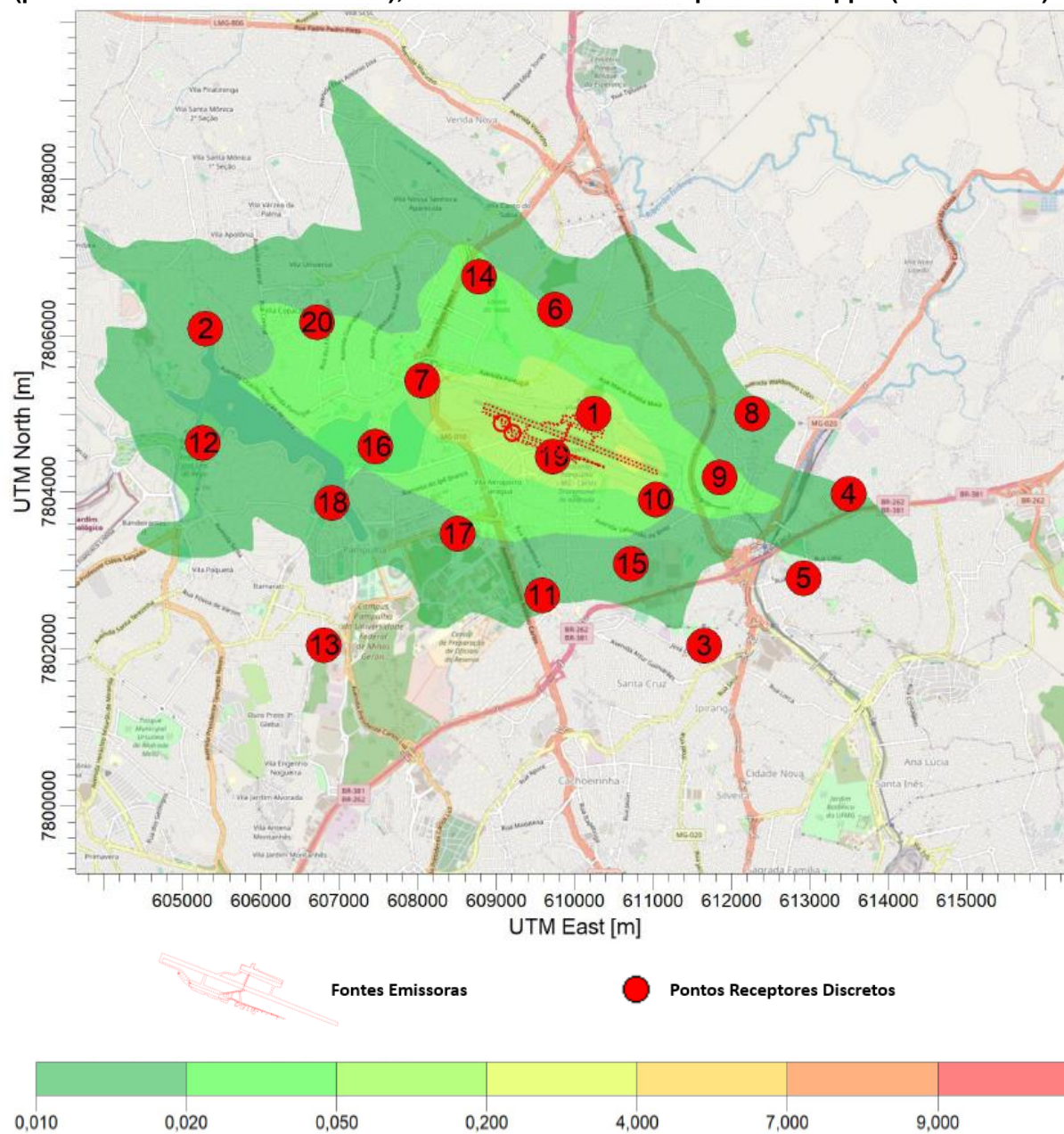
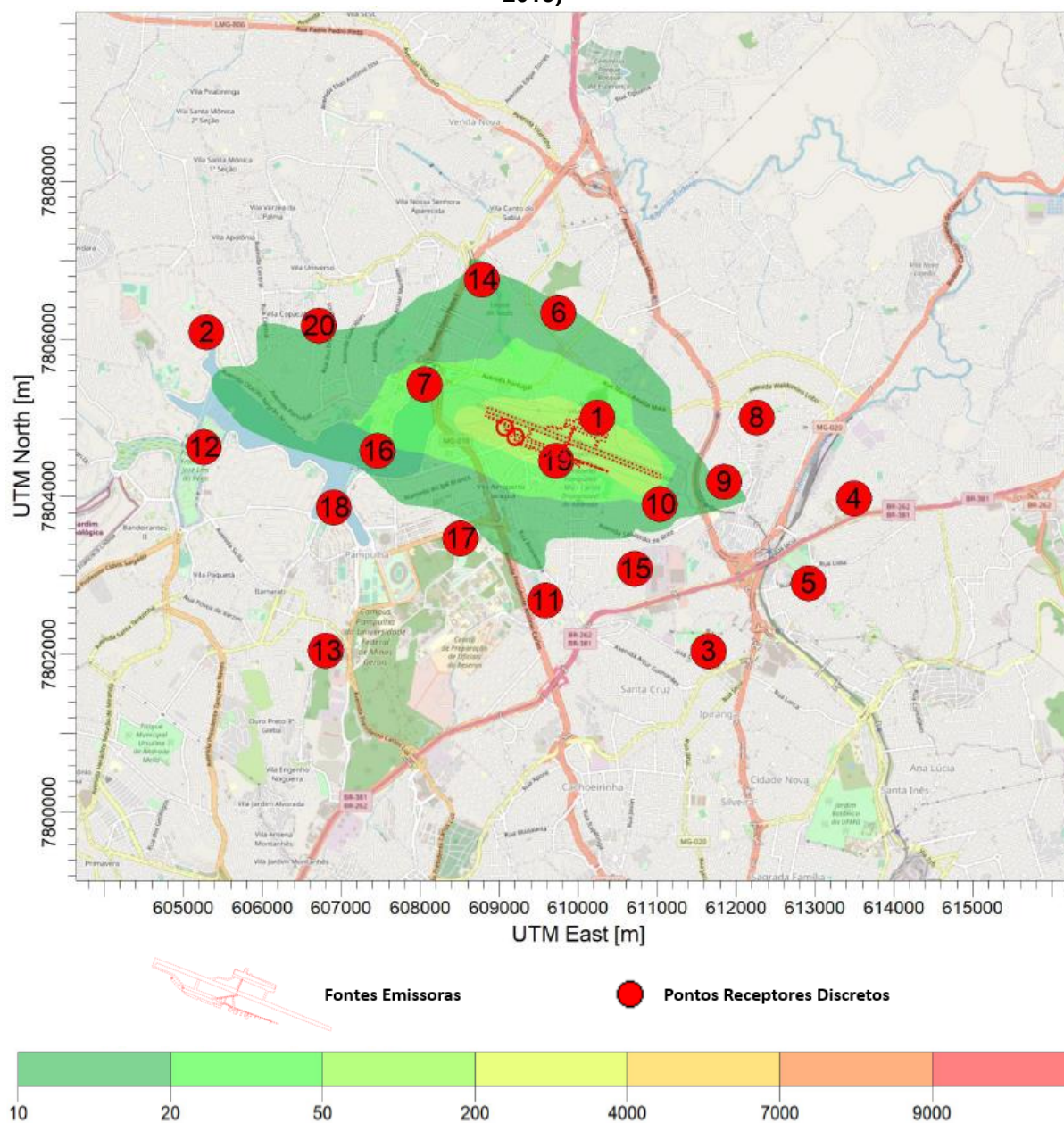


Figura 47 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015)



De forma complementar às isolinhas apresentadas anteriormente (Figura 35 à Figura 47), por meio da Tabela 16 são apresentadas as concentrações modeladas no “cenário 2015” para cada ponto receptor discreto (PRD).

Tabela 16 – Concentrações modeladas para os pontos receptores discretos (cenário 2015)

PRD	PTS ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		MP ₁₀ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		MP _{2,5} ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		NO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)			SO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		CO (ppm)	CO (mg.m^{-3})
	24h	Anual	24h	Anual	24h	Anual	1h	24h	Anual	24h	Anual	8h	24h
1	0,554	0,091	0,547	0,090	0,518	0,085	60,244	17,660	2,966	2,643	0,437	0,082	0,052
2	0,089	0,039	0,088	0,038	0,083	0,036	16,766	2,830	1,266	0,400	0,169	0,014	0,009
3	0,039	0,004	0,038	0,004	0,036	0,003	10,625	1,284	0,120	0,139	0,015	0,009	0,004
4	0,043	0,002	0,042	0,002	0,040	0,002	18,052	1,412	0,063	0,172	0,008	0,011	0,004
5	0,027	0,002	0,027	0,002	0,025	0,002	15,750	0,980	0,069	0,100	0,007	0,007	0,003
6	0,120	0,013	0,119	0,012	0,112	0,012	15,002	3,864	0,413	0,524	0,056	0,016	0,011
7	0,304	0,143	0,300	0,141	0,284	0,134	46,492	9,756	4,694	1,446	0,682	0,067	0,029
8	0,055	0,004	0,054	0,004	0,052	0,004	22,902	1,746	0,142	0,248	0,019	0,012	0,005
9	0,129	0,006	0,127	0,006	0,120	0,006	32,924	4,237	0,199	0,527	0,026	0,032	0,012
10	0,153	0,017	0,151	0,016	0,143	0,016	30,626	4,958	0,547	0,725	0,079	0,026	0,015
11	0,116	0,010	0,115	0,010	0,109	0,009	11,512	3,835	0,317	0,546	0,043	0,015	0,011
12	0,084	0,028	0,083	0,028	0,079	0,026	14,257	2,758	0,912	0,368	0,123	0,012	0,008
13	0,030	0,005	0,029	0,005	0,028	0,005	8,348	0,968	0,169	0,119	0,020	0,006	0,003
14	0,125	0,011	0,123	0,011	0,116	0,011	13,154	3,999	0,369	0,493	0,047	0,026	0,012
15	0,071	0,010	0,070	0,010	0,067	0,009	15,370	2,364	0,327	0,310	0,044	0,016	0,007
16	0,165	0,074	0,162	0,073	0,154	0,069	25,887	5,403	2,408	0,743	0,338	0,028	0,016
17	0,082	0,020	0,081	0,020	0,077	0,019	15,852	2,725	0,650	0,366	0,090	0,016	0,008
18	0,101	0,022	0,099	0,022	0,094	0,021	16,965	3,218	0,719	0,463	0,098	0,019	0,010
19	0,713	0,444	0,704	0,438	0,666	0,414	73,365	23,417	14,527	3,448	2,174	0,111	0,068
20	0,093	0,040	0,091	0,040	0,087	0,037	19,253	3,036	1,313	0,378	0,165	0,023	0,009
Máximo	0,713	0,444	0,704	0,438	0,666	0,414	73,365	23,417	14,527	3,448	2,174	0,111	0,068
Mínimo	0,027	0,002	0,027	0,002	0,025	0,002	8,348	0,968	0,063	0,100	0,007	0,006	0,003

No que tange especificamente aos PRD's, as concentrações obtidas por meio das modelagens de PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), MP_{2,5} (24 horas e anual), NO₂ (1 hora e 24 horas), SO₂ (24 horas e anual) e CO (8 horas e 24 horas) foram integralmente inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023, considerando os padrões intermediários 1, 2, 3 e o padrão final, assim como também estiveram abaixo dos valores guia estabelecidos pelas Diretrizes de 2021 da OMS, abrangendo os padrões interinos 1, 2, 3, 4 e o nível guia de qualidade do ar. O único resultado modelado acima de algum dos padrões de

referência considerados foi o NO₂ (anual), cujo resultado modelado para o PRD 19 (14,527 µg.m⁻³) foi superior ao padrão final (AQG) da OMS (10 µg.m⁻³).

Observou-se que a maior concentração modelada de PTS (24 horas) dentre os pontos receptores discretos foi de 0,713 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,027 µg.m⁻³ no PRD 5, ao passo que a maior concentração modelada para PTS (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 0,444 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,002 µg.m⁻³ no PRD 4.

No que se refere ao MP₁₀ (24 horas) observou-se que a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 0,704 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,027 µg.m⁻³ no PRD 5, ao passo que a maior concentração modelada para MP₁₀ (anual) dentre os PRD's foi de 0,438 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,002 µg.m⁻³ no PRD 4.

Quanto ao MP_{2,5} (24 horas) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 0,666 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,025 µg.m⁻³ no PRD 5, sendo que a maior concentração modelada para MP_{2,5} (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 0,414 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,002 µg.m⁻³ no PRD 4.

Quanto ao NO₂ (1 hora) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 73,365 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 8,348 µg.m⁻³ no PRD 13, ao passo que a maior concentração modelada para NO₂ (24 horas) dentre os pontos receptores discretos foi de 23,417 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,968 µg.m⁻³ no PRD 13. Já a maior concentração modelada de NO₂ (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 14,527 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,063 µg.m⁻³ no PRD 4. Conforme mencionado, a concentração modelada (14,527 µg.m⁻³) para NO₂ (anual) ficou acima do padrão final (AQG) estabelecido pela OMS (10 µg.m⁻³). Ainda que os limites da OMS sejam recomendações a serem seguidas e mesmo que as emissões de NO₂ (anual) possam estar superestimadas, tendo em vista que todo o NO_x constante no inventário foi considerado como NO₂, cabe destacar a possibilidade, a partir das premissas consideradas no presente estudo, de ocorrência destas concentrações. Vale destacar que modelagens de qualidade do ar realizadas

em outros aeroportos também sugeriram o potencial de concentrações de NO₂ representativas, tal como o estudo de Simonetti, Maltagliati e Manfrida (2015), que também indicou potencial de ocorrência, nos portões do Aeroporto em Florença, de concentrações de NO_x acima dos limites de referência aplicáveis ao estudo.

No que tange ao SO₂ (24 horas) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 3,448 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,100 µg.m⁻³ no PRD 5, sendo que a maior concentração modelada para SO₂ (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 2,174 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,007 µg.m⁻³ no PRD 5.

Por fim, no que se refere ao CO (8 horas) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 0,111 ppm no PRD 19 e a menor foi igual a 0,006 ppm no PRD 13, ao passo que a maior concentração modelada para CO (24 horas) dentre os pontos receptores discretos foi de 0,068 mg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,003 mg.m⁻³ no PRD 5.

Sob uma ótica mais ampla, embora os resultados, com exceção do NO_x (anual), tenham demonstrado potencial de atendimento aos respectivos padrões de referência, importante mencionar que impactos à saúde humana ainda podem se fazer presentes. Tal afirmativa é corroborada por estudo realizado por Schlenker e Walker (2016) com foco na exposição à poluição atmosférica de comunidades vizinhas aos doze maiores aeroportos da Califórnia. Tais autores afirmam que embora a concentração máxima horária de CO constatada em seu estudo tenha sido de 7,5 ppm, abaixo, portanto, dos padrões de qualidade do ar referenciados em seu estudo para os períodos de 1 hora (35 ppm) e 8 horas (9 ppm), o trabalho por eles conduzido sugere que as flutuações nas emissões atmosféricas em aeroportos, causadas por variações na dinâmica operacional dos aviões, tais como elevado tempo que os aviões passam parados na pista ou pelo excesso de marcha lenta do avião, podem implicar em emissões concentradas pontualmente com efeitos diretos e adversos na saúde humana. Assim, considerando que a modelagem consiste em um instrumento complementar ao monitoramento *in situ*, observa-se a importância da estruturação e implantação de um plano de monitoramento ambiental para que se possa avaliar efetivamente a dinâmica da dispersão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha,

permitindo confirmar o quão fidedignas são as concentrações modeladas obtidas no presente estudo e qual a real influência do empreendimento na qualidade do ar local.

5.5. Modelagem da Dispersão Atmosférica (“cenário 2015 + 50%”)

Por meio do uso do AERMOD ViewTM foi também possível modelar o “cenário 2015 + 50%”, o qual contemplou os mesmos poluentes do “cenário 2015”, porém sendo considerado um acréscimo de 50% nas emissões do “cenário 2015” para cada poluente. Assim, foram modelados os poluentes CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora, 24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), e MP_{2,5} (24 horas e anual). Importante mencionar que, considerando os resultados obtidos no capítulo 5.3, para o presente cenário também foi adotada a configuração de grade ID 01 da Tabela 6. Tal como a modelagem referente ao “cenário 2015”, o cenário com acréscimo de 50% das emissões em relação a 2015 pode dar indícios da dinâmica da dispersão atmosférica no entorno do Aeroporto da Pampulha em anos que apresentem comportamento similar a este cenário em termos operacionais, meteorológicos e que disponham das demais premissas adotadas na modelagem em questão.

Cabe mencionar que, assim como observado no “cenário 2015”, as maiores concentrações dos poluentes modelados, considerando o domínio como um todo (PRD's e pontos receptores de grade), foram observadas dentro dos limites do Aeroporto da Pampulha. Este cenário, que já era esperado, se deve ao fato de que as fontes emissoras consideradas no modelo se encontram no interior do empreendimento, tal como já discutido para o “cenário 2015”. Em relação às máximas concentrações modeladas em todo o domínio, considerando PRD's e pontos receptores de grade, observou-se que os resultados de CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual) e MP_{2,5} (24 horas e anual) estiveram em conformidade com os limites previstos nos padrões intermediários e finais da Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023, bem como abaixo dos valores guia estabelecidos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS. As exceções foram observadas para concentrações associadas aos períodos de referência de 24 horas e anual do poluente NO₂, as quais apresentaram para a área interna do Aeroporto da Pampulha: **i)** concentrações

(99,608 $\mu\text{g.m}^{-3}$) para o período de referência de 24 horas superiores ao padrão interino 2 (50 $\mu\text{g.m}^{-3}$) e ao nível guia de qualidade do ar (25 $\mu\text{g.m}^{-3}$) previstos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS; e **ii**) concentrações (102,148 $\mu\text{g.m}^{-3}$) para o período de referência anual superiores ao padrão interino 1 (40 $\mu\text{g.m}^{-3}$), padrão interino 2 (30 $\mu\text{g.m}^{-3}$), padrão interino 3 (20 $\mu\text{g.m}^{-3}$) e nível guia de qualidade do ar (10 $\mu\text{g.m}^{-3}$) previstos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS, bem como ao padrão intermediário 1 (60 $\mu\text{g.m}^{-3}$), padrão intermediário 2 (50 $\mu\text{g.m}^{-3}$), padrão intermediário 3 (45 $\mu\text{g.m}^{-3}$) e padrão final (40 $\mu\text{g.m}^{-3}$) da Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023.

As isolinhas de concentração do “cenário 2015 + 50%” referentes ao parâmetro PTS são apresentadas por meio da Figura 48 e da Figura 49, as quais referem-se, respectivamente, aos resultados deste poluente associados aos períodos de referência de 24 horas e anual. Já as isolinhas de concentração referentes ao MP_{10} são evidenciadas por meio da Figura 50 e da Figura 51, estando associadas, respectivamente, aos resultados deste poluente para os períodos de referência de 24 horas e anual. As isolinhas de concentração relacionadas ao $\text{MP}_{2,5}$ são apresentadas por meio da Figura 52 e da Figura 53, referindo-se, respectivamente, aos resultados deste poluente associados aos períodos de referência de 24 horas e anual. Quanto ao NO_2 , suas isolinhas de concentração são elucidadas por meio da Figura 54, Figura 55 e Figura 56, as quais referem-se, respectivamente, aos resultados deste poluente associados aos períodos de referência de 1 hora, 24 horas e anual. Já as isolinhas de concentração referentes ao SO_2 são apresentadas por meio da Figura 57 e da Figura 58, sendo que estas estão relacionadas, respectivamente, aos resultados deste poluente para os períodos de referência de 24 horas e anual. Por fim, as isolinhas de concentração referentes ao CO são apresentadas por meio da Figura 59 e da Figura 60, as quais referem-se, respectivamente, aos resultados deste poluente para os períodos de referência de 8 horas e 24 horas.

Figura 48 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

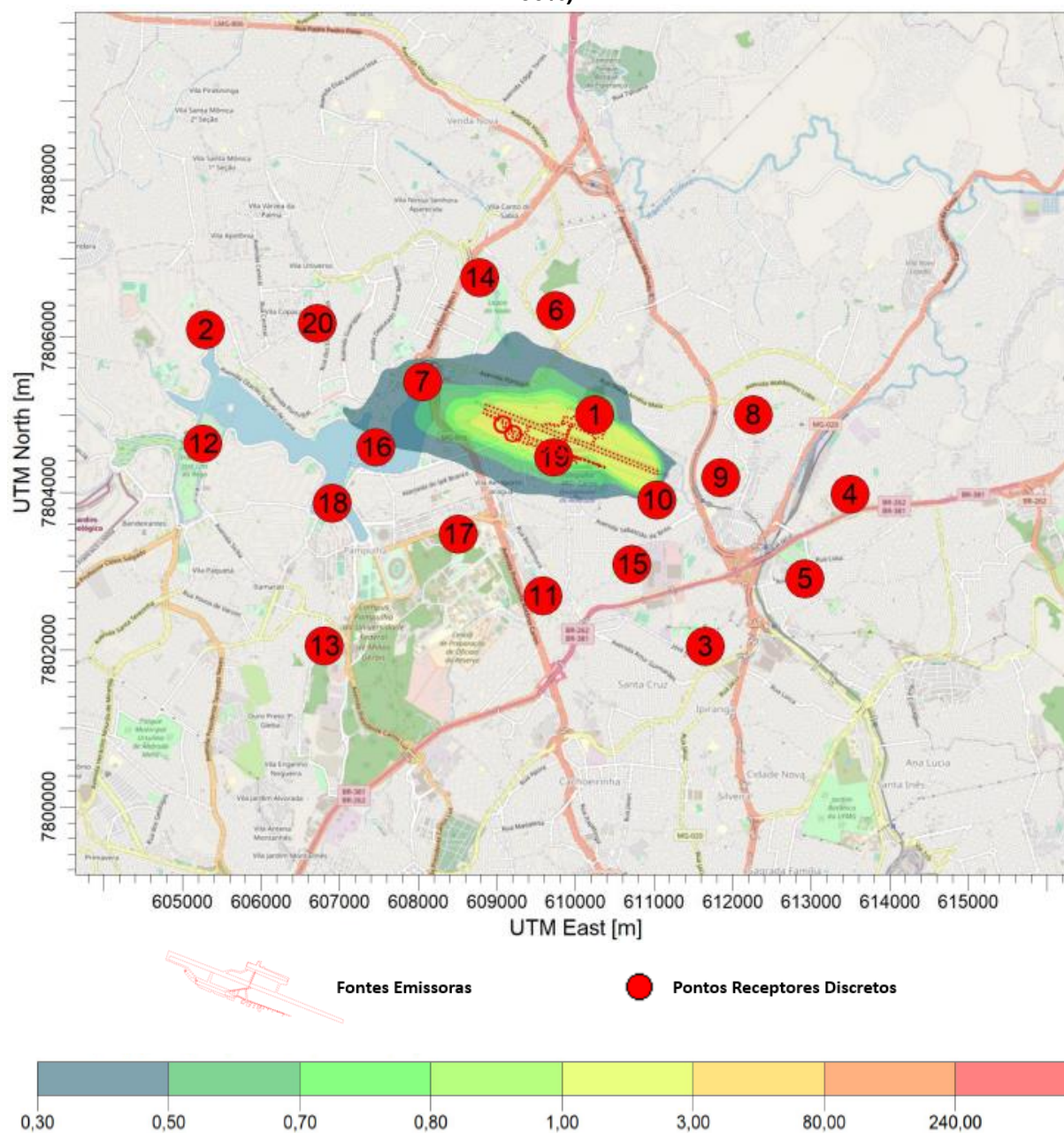


Figura 49 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de PTS (período de referência anual), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

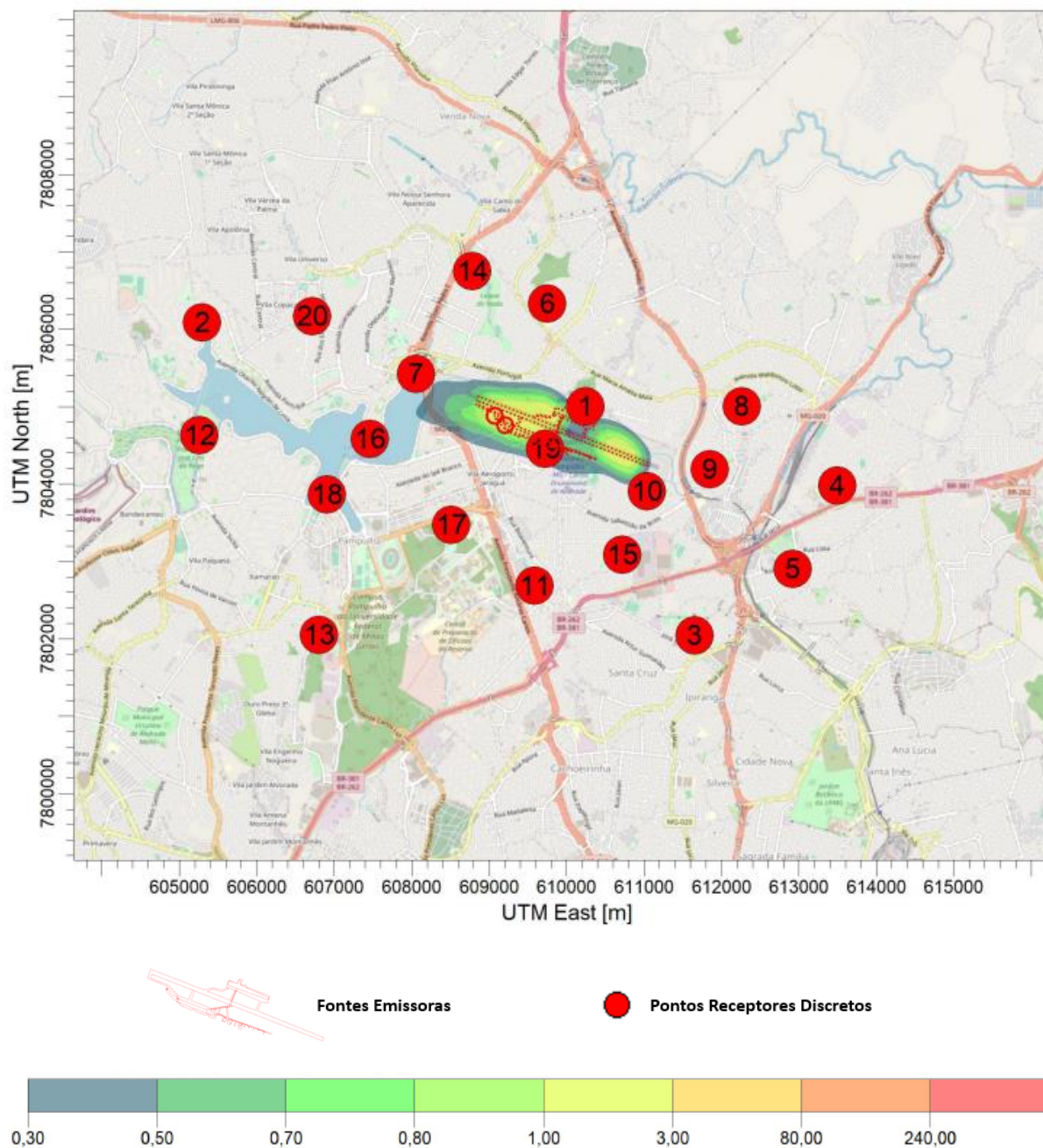


Figura 50 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP_{10} (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu g \cdot m^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

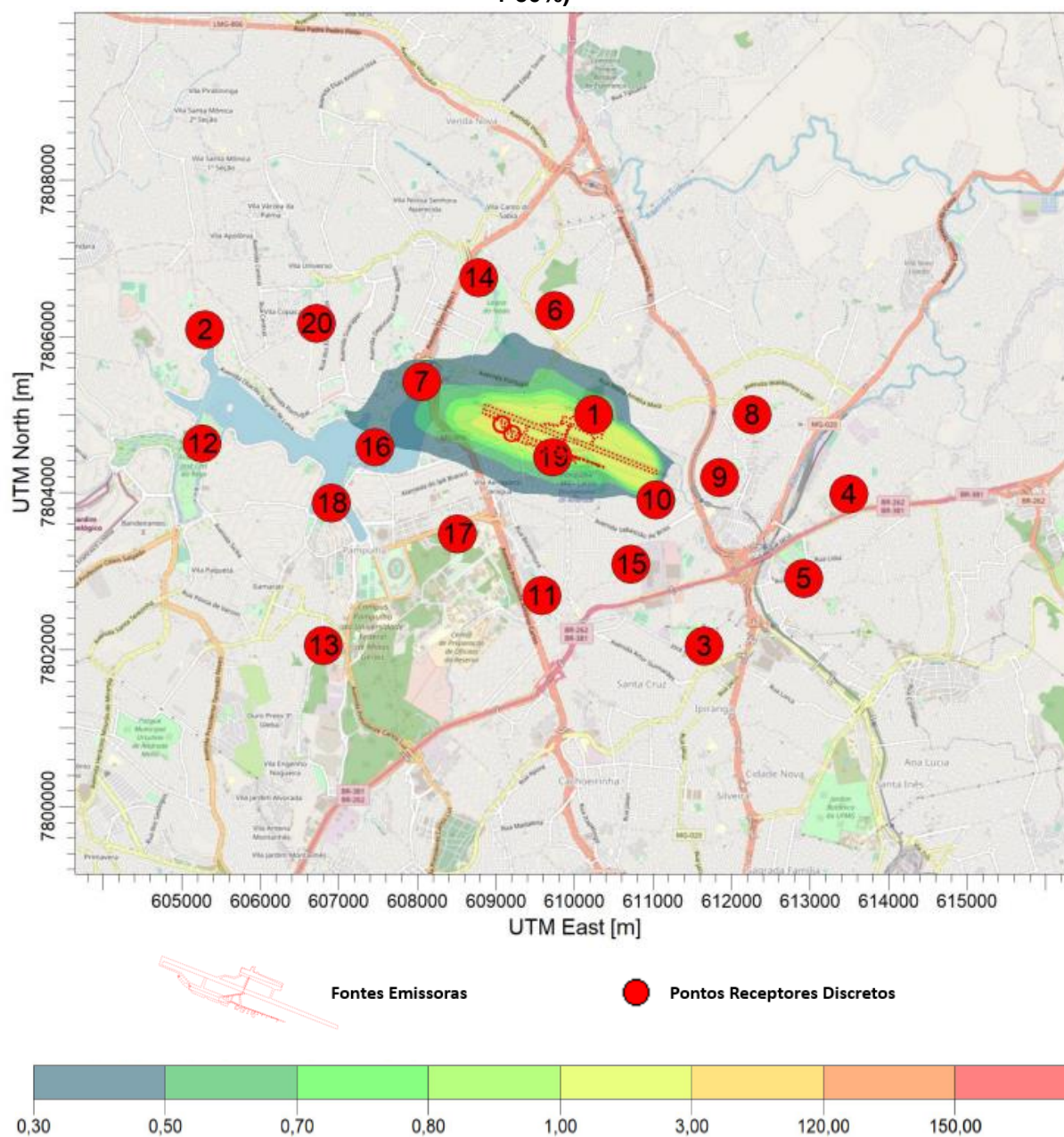


Figura 51 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP_{10} (período de referência anual), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

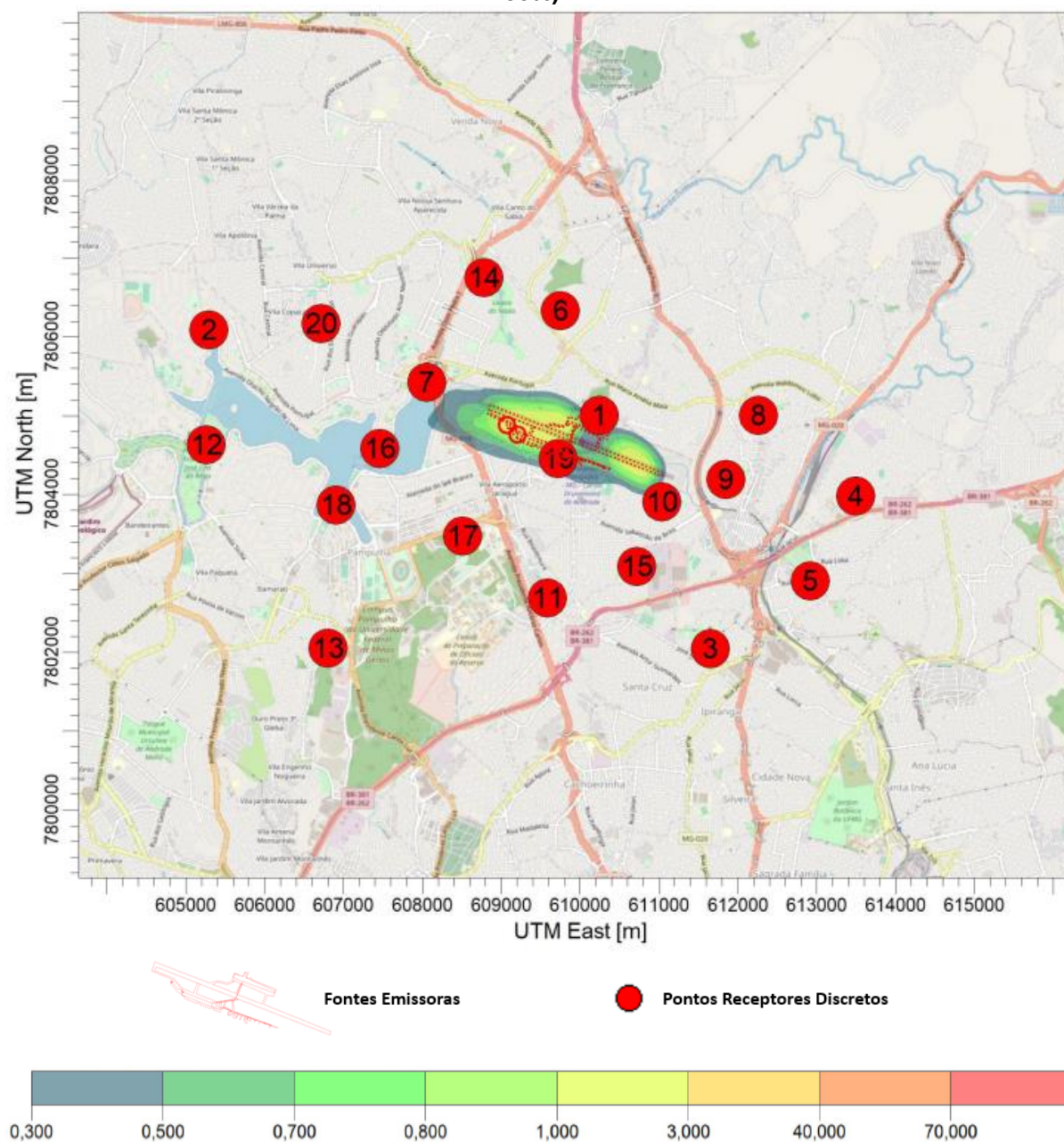


Figura 52 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de $MP_{2,5}$ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

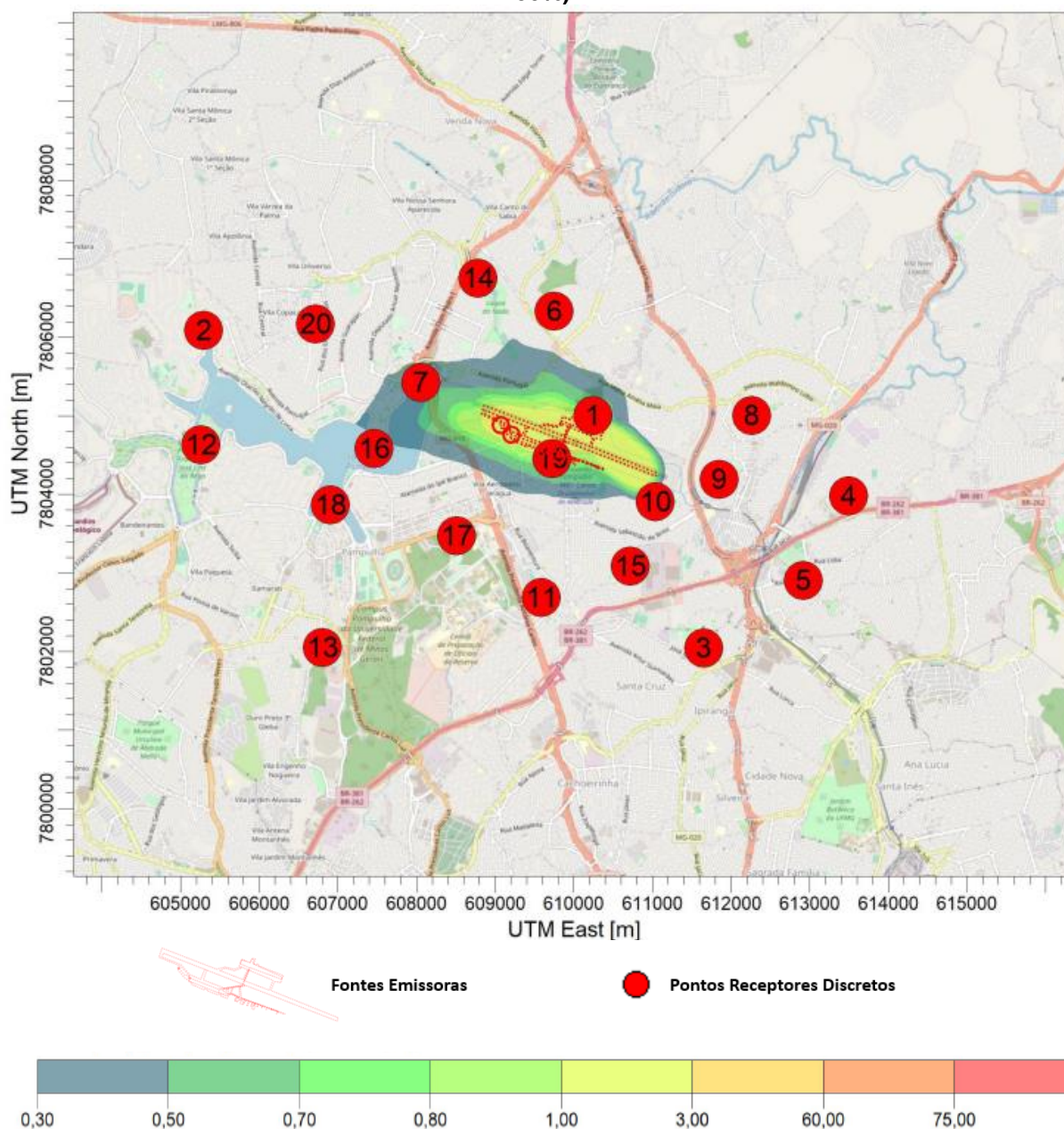


Figura 53 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de MP_{2,5} (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015 + 50%)

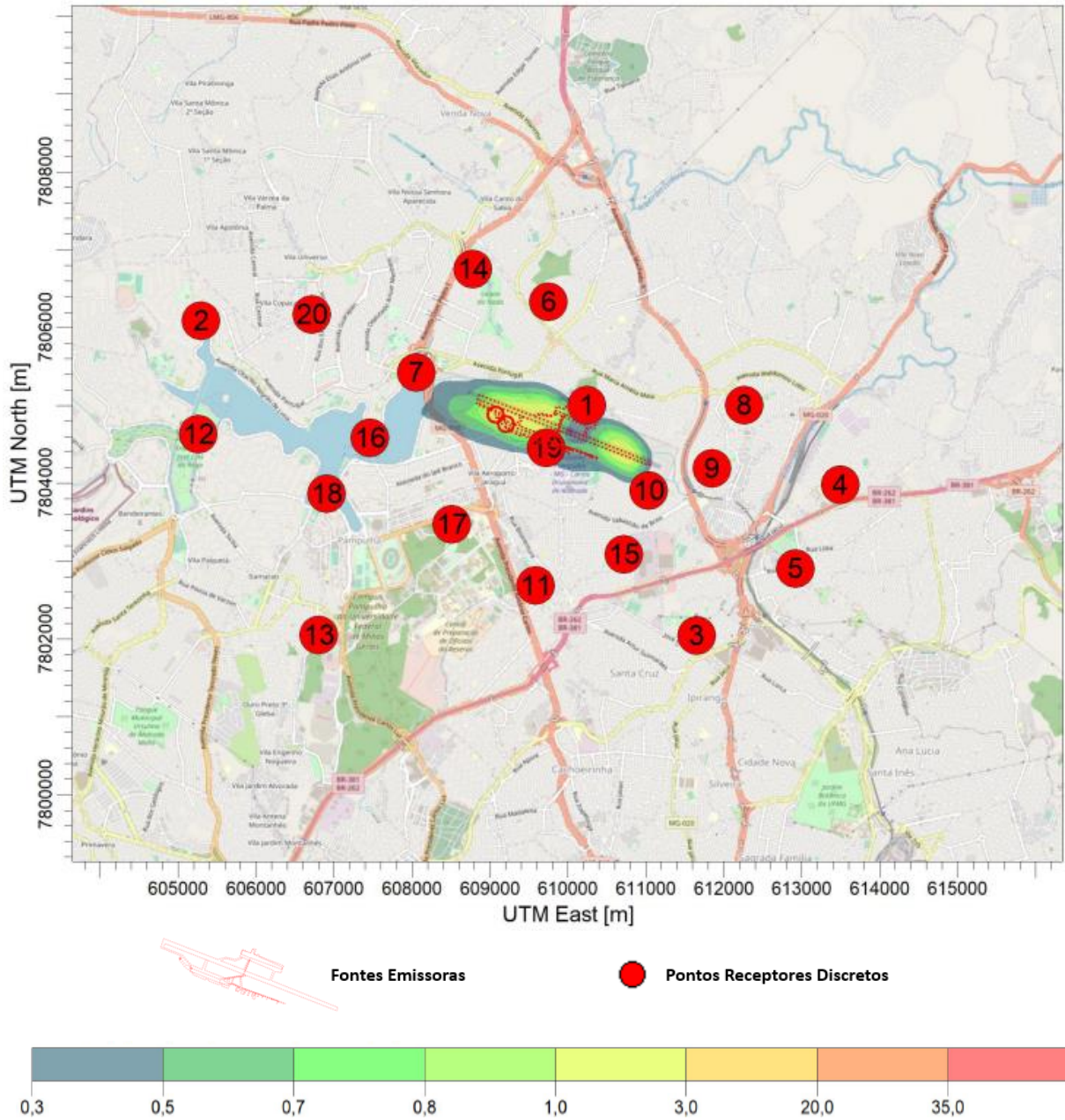


Figura 54 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO₂ (período de referência de 1 hora), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

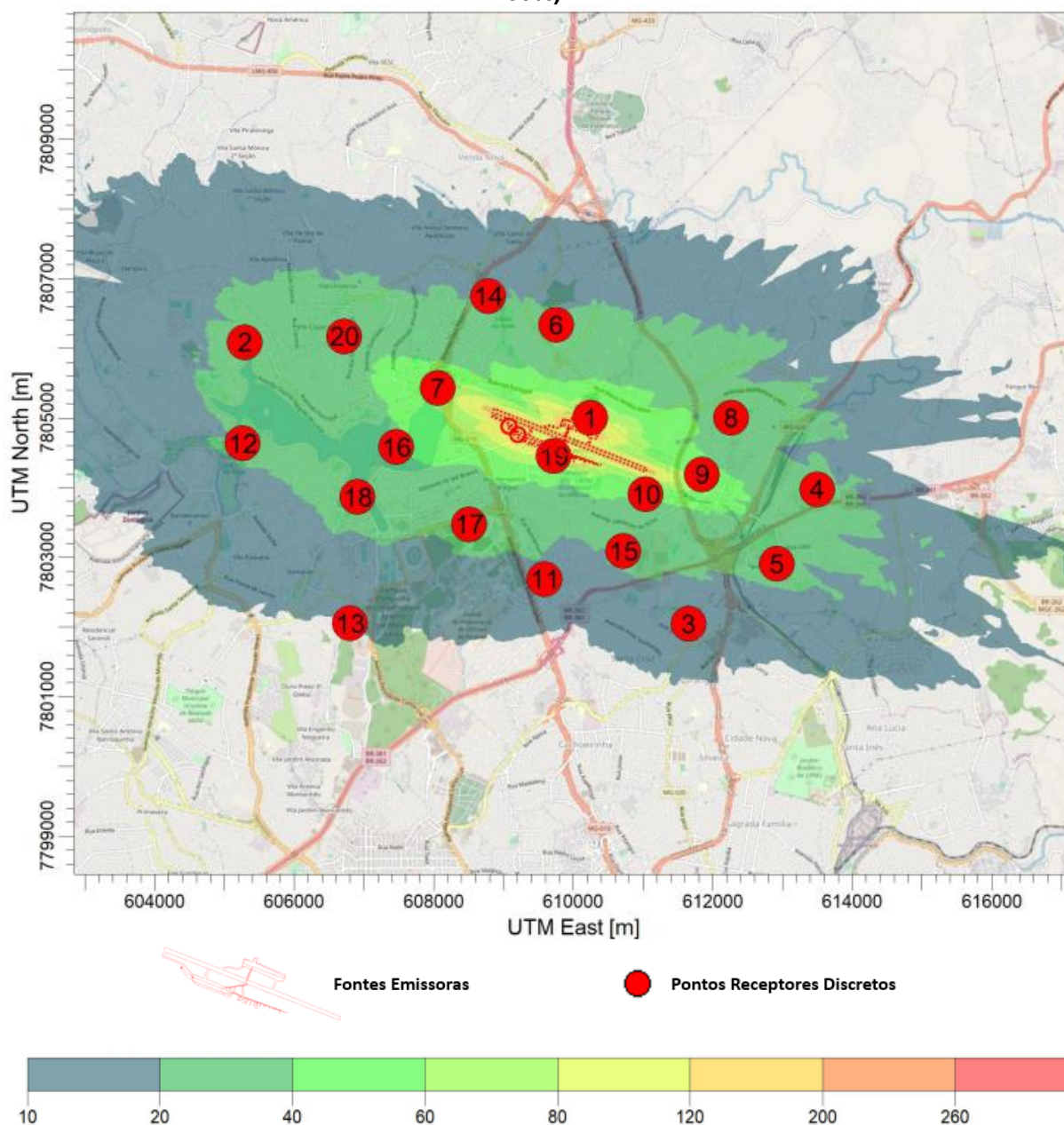


Figura 55 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)

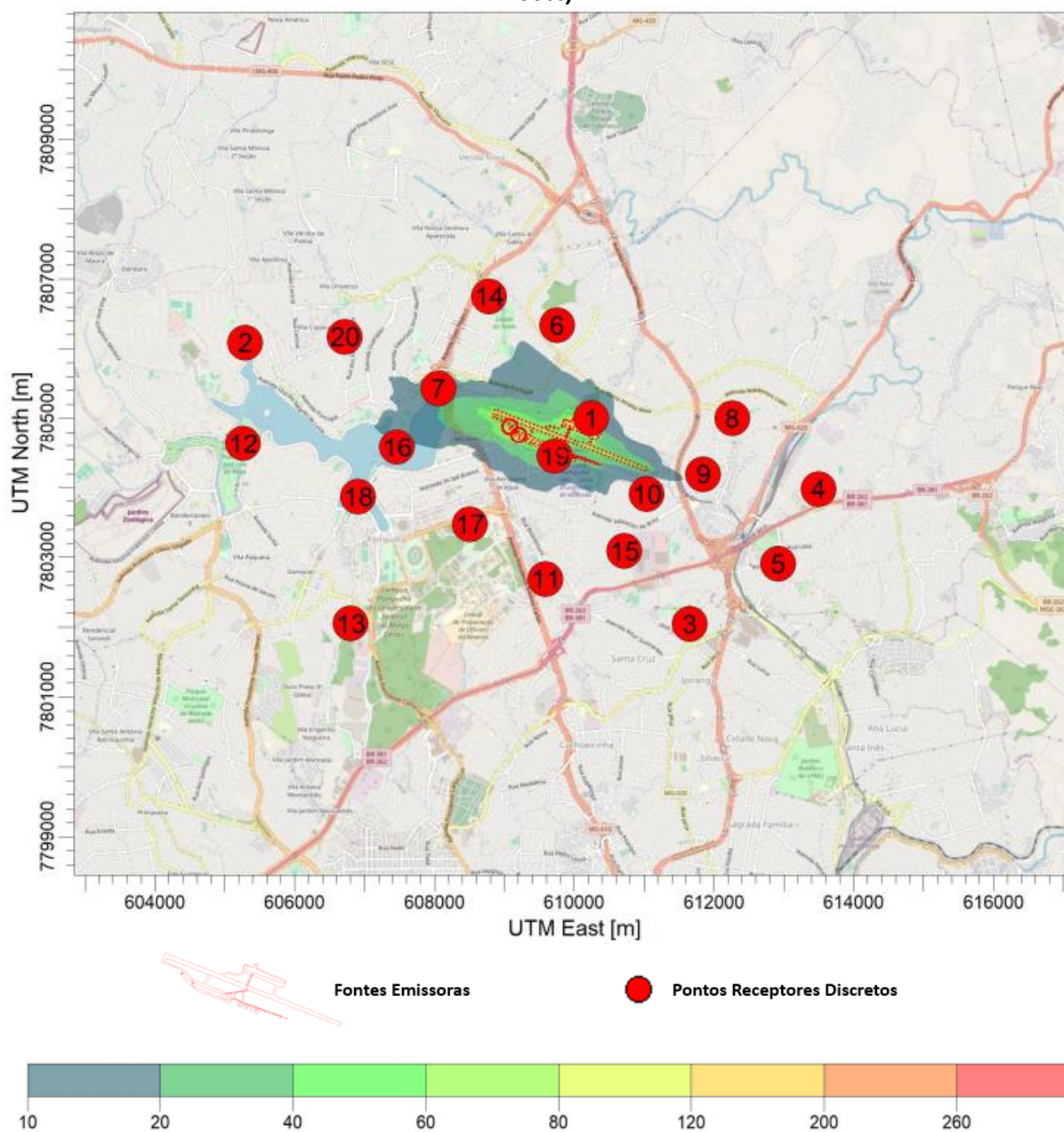


Figura 56 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de NO₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015 + 50%)

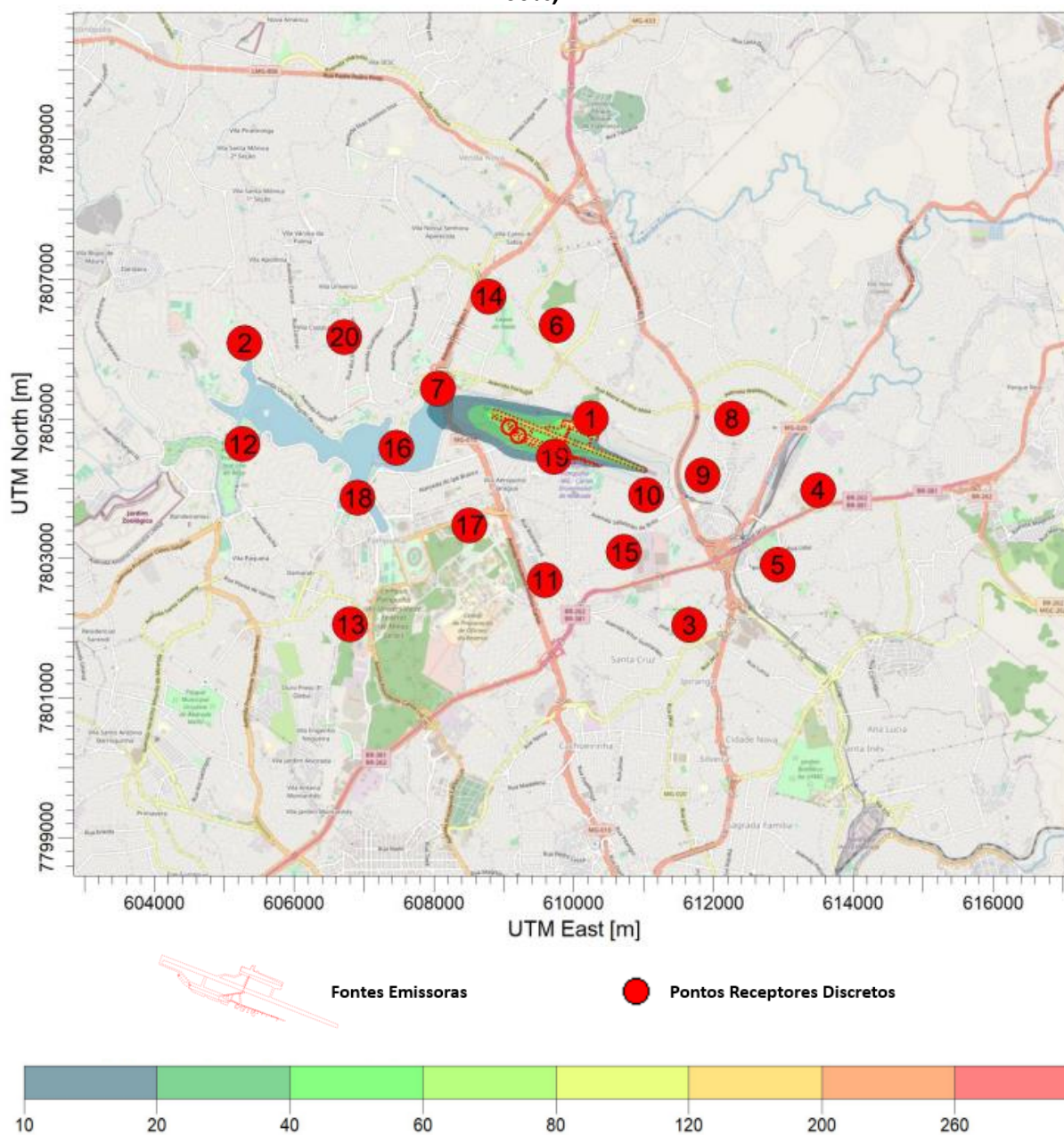


Figura 57 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO₂ (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015 + 50%)

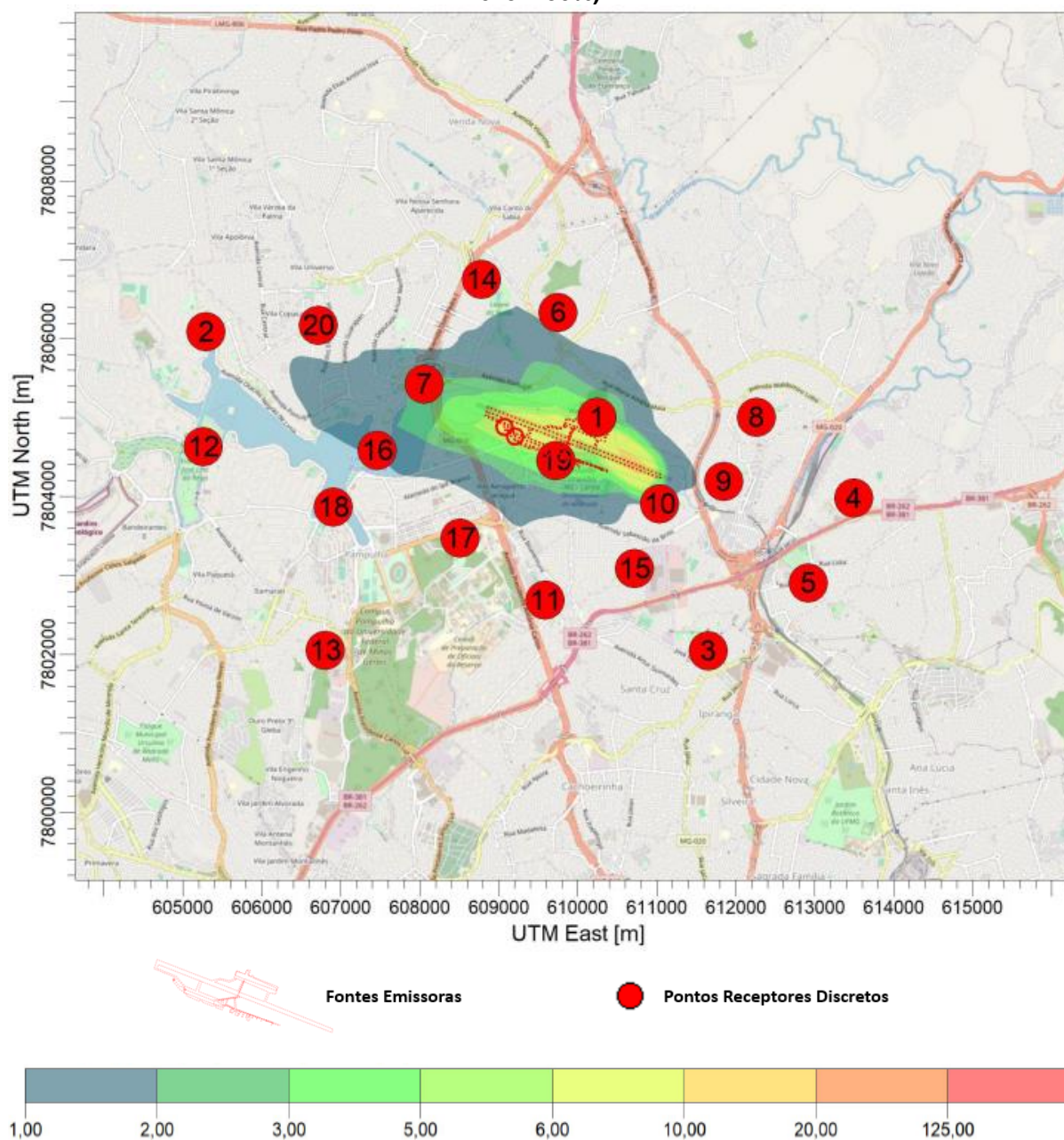


Figura 58 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de SO₂ (período de referência anual), estando os resultados expressos em µg.m⁻³ (cenário 2015 + 50%)

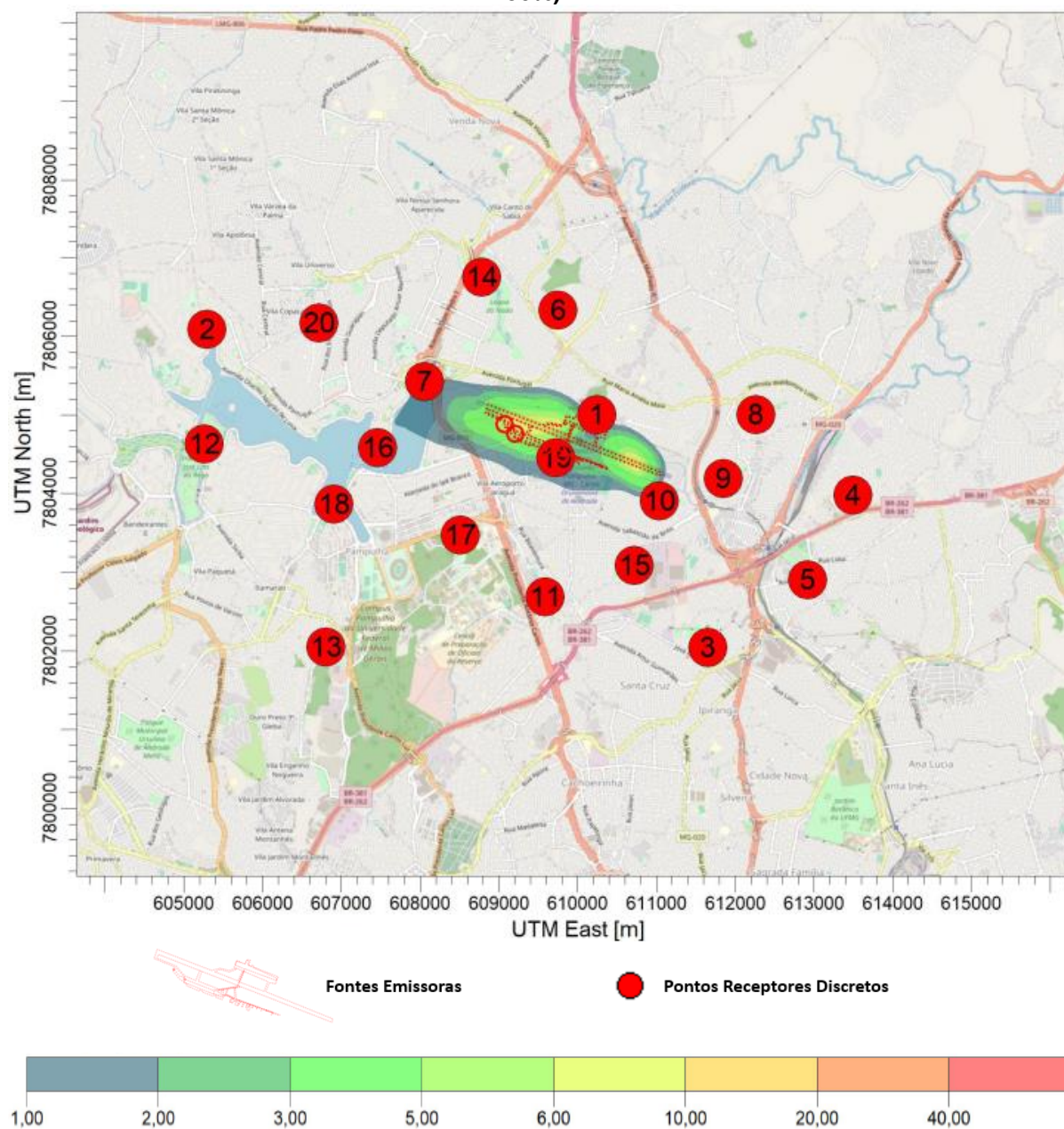


Figura 59 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 8 horas), estando os resultados expressos em ppm (cenário 2015 + 50%)

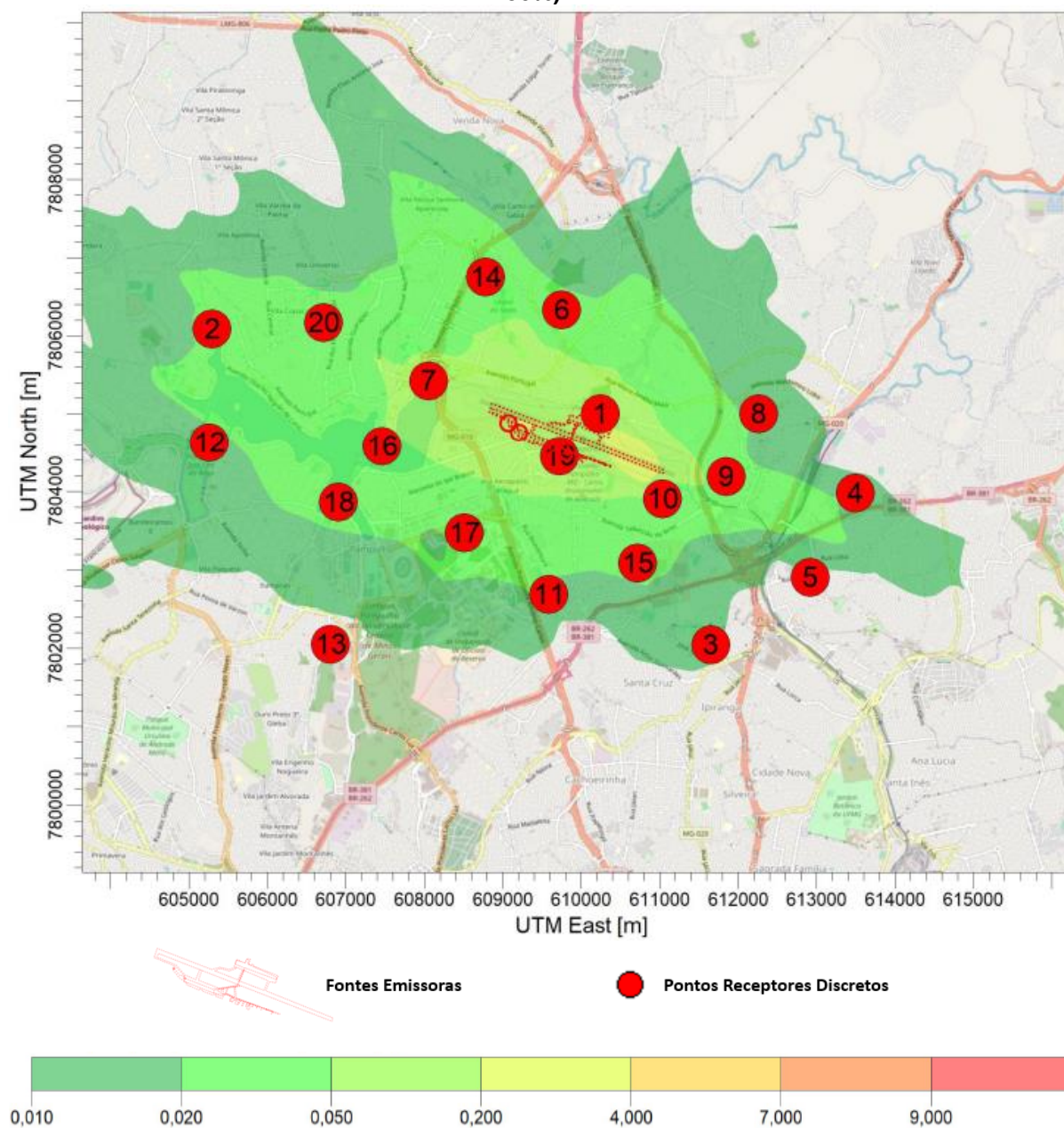
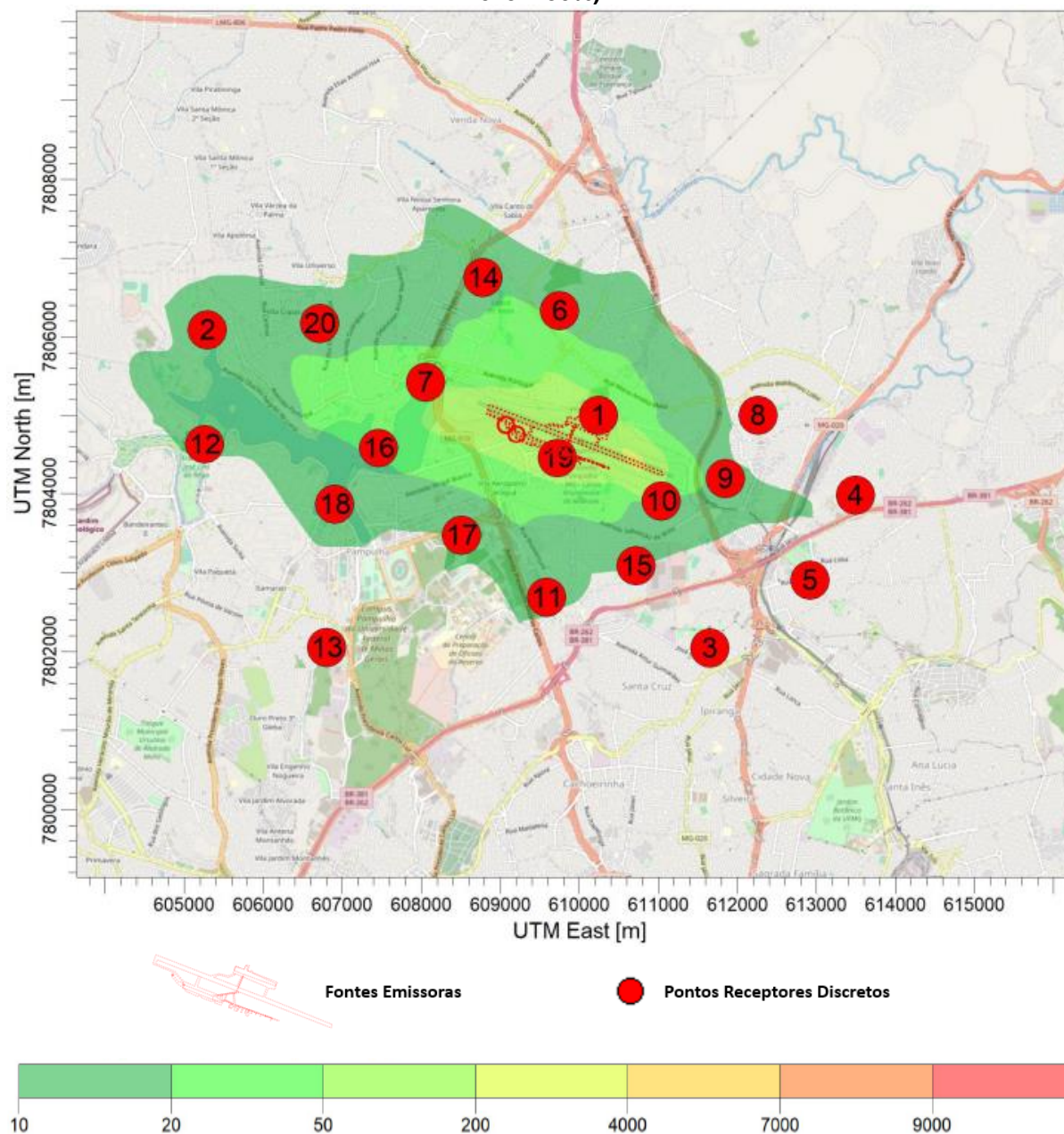


Figura 60 – Isolinhas de concentração representando as concentrações modeladas de CO (período de referência de 24 horas), estando os resultados expressos em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cenário 2015 + 50%)



De forma complementar às isolinhas apresentadas anteriormente (Figura 48 à Figura 60), por meio da Tabela 17 são apresentadas as concentrações modeladas no “cenário 2015 + 50%” para cada ponto receptor discreto (PRD).

Tabela 17 – Concentrações modeladas para os pontos receptores discretos (cenário 2015 + 50%)

PRD	PTS ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		MP ₁₀ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		MP _{2,5} ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		NO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)			SO ₂ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		CO (ppm)	CO (mg.m^{-3})
	24h	Anual	24h	Anual	24h	Anual	1h	24h	Anual	24h	Anual	8h	24h
1	0,554	0,091	0,547	0,090	0,518	0,085	90,365	26,489	4,449	2,643	0,437	0,082	0,052
2	0,089	0,039	0,088	0,038	0,083	0,036	25,149	4,244	1,899	0,400	0,169	0,014	0,009
3	0,039	0,004	0,038	0,004	0,036	0,003	15,937	1,927	0,180	0,139	0,015	0,009	0,004
4	0,043	0,002	0,042	0,002	0,040	0,002	27,078	2,118	0,095	0,172	0,008	0,011	0,004
5	0,027	0,002	0,027	0,002	0,025	0,002	23,625	1,469	0,103	0,100	0,007	0,007	0,003
6	0,120	0,013	0,119	0,012	0,112	0,012	22,503	5,796	0,620	0,524	0,056	0,016	0,011
7	0,304	0,143	0,300	0,141	0,284	0,134	69,737	14,634	7,040	1,446	0,682	0,067	0,029
8	0,055	0,004	0,054	0,004	0,052	0,004	34,353	2,619	0,213	0,248	0,019	0,012	0,005
9	0,129	0,006	0,127	0,006	0,120	0,006	49,385	6,356	0,298	0,527	0,026	0,032	0,012
10	0,153	0,017	0,151	0,016	0,143	0,016	45,939	7,436	0,821	0,725	0,079	0,026	0,015
11	0,116	0,010	0,115	0,010	0,109	0,009	17,268	5,752	0,476	0,546	0,043	0,015	0,011
12	0,084	0,028	0,083	0,028	0,079	0,026	21,386	4,136	1,368	0,368	0,123	0,012	0,008
13	0,030	0,005	0,029	0,005	0,028	0,005	12,522	1,452	0,253	0,119	0,020	0,006	0,003
14	0,125	0,011	0,123	0,011	0,116	0,011	19,731	5,999	0,554	0,493	0,047	0,026	0,012
15	0,071	0,010	0,070	0,010	0,067	0,009	23,055	3,546	0,490	0,310	0,044	0,016	0,007
16	0,165	0,074	0,162	0,073	0,154	0,069	38,829	8,105	3,613	0,743	0,338	0,028	0,016
17	0,082	0,020	0,081	0,020	0,077	0,019	23,777	4,087	0,976	0,366	0,090	0,016	0,008
18	0,101	0,022	0,099	0,022	0,094	0,021	25,448	4,826	1,078	0,463	0,098	0,019	0,010
19	0,713	0,444	0,704	0,438	0,666	0,414	107,200	35,126	21,788	3,448	2,174	0,111	0,068
20	0,093	0,040	0,091	0,040	0,087	0,037	28,880	4,553	1,970	0,378	0,165	0,023	0,009
Máximo	0,713	0,444	0,704	0,438	0,666	0,414	107,200	35,126	21,788	3,448	2,174	0,111	0,068
Mínimo	0,027	0,002	0,027	0,002	0,025	0,002	12,522	1,452	0,095	0,100	0,007	0,006	0,003

No que tange especificamente aos PRD's, assim como observado para o “cenário 2015”, o “cenário 2015 + 50%” indicou concentrações modeladas de PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), MP_{2,5} (24 horas e anual), NO₂ (1 hora), SO₂ (24 horas e anual) e CO (8 horas e 24 horas) integralmente inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023, considerando os padrões intermediários 1, 2, 3 e o padrão final, assim como também estiveram abaixo dos valores guia estabelecidos pelas Diretrizes de 2021 da OMS, abrangendo os padrões interinos 1, 2, 3, 4 e o nível guia de qualidade do ar. Tal como observado no

“cenário 2015”, a exceção se refere ao parâmetro NO₂, especificamente quanto aos resultados modelados de NO₂ (24 horas) no PRD 1 e PRD 19, bem como ao NO₂ (anual) no PRD 19, os quais estiveram acima dos valores guia da OMS de 2021, tal como será detalhado na sequência.

Observou-se que a maior concentração modelada de PTS (24 horas) dentre os pontos receptores discretos foi de 1,070 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,041 µg.m⁻³ no PRD 5, ao passo que a maior concentração modelada para PTS (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 0,665 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,003 µg.m⁻³ no PRD 4.

No que se refere ao MP₁₀ (24 horas) observou-se que a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 1,056 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,040 µg.m⁻³ no PRD 5, ao passo que a maior concentração modelada para MP₁₀ (anual) dentre os PRD's foi de 0,657 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,003 µg.m⁻³ no PRD 4.

Quanto ao MP_{2,5} (24 horas) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 1,000 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,038 µg.m⁻³ no PRD 5, sendo que a maior concentração modelada para MP_{2,5} (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 0,622 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,003 µg.m⁻³ no PRD 4.

Quanto ao NO₂ (1 hora) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de 107,200 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 12,522 µg.m⁻³ no PRD 13. A maior concentração modelada para NO₂ (24 horas) dentre os pontos receptores discretos foi de 35,126 µg.m⁻³ no PRD 19, sendo também importante destacar a segunda maior concentração, igual a 26,489 µg.m⁻³ no PRD 1, ao passo que a menor foi igual a 1,452 µg.m⁻³ no PRD 13. Já a maior concentração modelada de NO₂ (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de 21,788 µg.m⁻³ no PRD 19 e a menor foi igual a 0,095 µg.m⁻³ no PRD 4. Assim, no que se refere às concentrações modeladas de 24 horas para NO₂, foram observadas concentrações de 35,126 µg.m⁻³ no PRD 19 e de 26,489 µg.m⁻³ no PRD 01, superiores, portanto, ao valor guia final da OMS (25 µg.m⁻³), ao passo que em relação às concentrações anuais modeladas de NO₂, foi

observada no PRD 19 uma concentração de $21,788 \mu\text{g.m}^{-3}$, superior, portanto, aos limites do padrão interino 3 da OMS ($20 \mu\text{g.m}^{-3}$) e do valor guia final da OMS ($10 \mu\text{g.m}^{-3}$). Ainda que os limites da OMS sejam recomendações a serem seguidas e mesmo que as emissões de NO_2 (24 horas e anual) possam estar superestimadas, tendo em vista que todo o NO_x constante no inventário foi considerado como NO_2 , cabe destacar a possibilidade, a partir das premissas consideradas no presente estudo, de ocorrência destas concentrações. Vale destacar que, tal como já abordado no “cenário 2015”, modelagens de qualidade do ar realizadas em outros aeroportos também sugeriram o potencial de concentrações de NO_2 representativas.

No que tange ao SO_2 (24 horas) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de $5,172 \mu\text{g.m}^{-3}$ no PRD 19 e a menor foi igual a $0,150 \mu\text{g.m}^{-3}$ no PRD 5, sendo que a maior concentração modelada para SO_2 (anual) dentre os pontos receptores discretos foi de $3,261 \mu\text{g.m}^{-3}$ no PRD 19 e a menor foi igual a $0,011 \mu\text{g.m}^{-3}$ no PRD 5.

Por fim, no que se refere ao CO (8 horas) a maior concentração modelada dentre os pontos receptores discretos foi de $0,167 \text{ ppm}$ no PRD 19 e a menor foi igual a $0,009 \text{ ppm}$ no PRD 13, ao passo que a maior concentração modelada para CO (24 horas) dentre os pontos receptores discretos foi de $0,103 \text{ mg.m}^{-3}$ no PRD 19 e a menor foi igual a $0,004 \text{ mg.m}^{-3}$ no PRD 13.

Tal como discutido para o “cenário 2015”, embora os resultados, com exceção do NO_x (24 horas e anual), tenham demonstrado potencial de atendimento aos respectivos padrões de referência, importante mencionar que emissões superiores às consideradas nas taxas de emissão do presente estudo podem se fazer presentes em função das características das operações aeroportuárias. Assim, considerando que a modelagem consiste em um instrumento complementar ao monitoramento *in situ*, reitera-se a importância da estruturação e implantação de um plano de monitoramento ambiental para avaliar em campo a real dinâmica da dispersão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha, permitindo confirmar o quão fidedignas são as concentrações modeladas obtidas no presente estudo.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto da emissão de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha sobre a qualidade do ar local, se valendo, para tanto, do uso da modelagem de dispersão atmosférica por meio do AERMOD View™ e da comparação frente a padrões de referência.

Procedeu-se inicialmente a um teste simulando quatro distintas configurações de grade no AERMOD View™, com o intuito de se avaliar, com base em alterações no espaçamento e número de células, a influência da utilização de uma grade menos refinada ou mais refinada na modelagem da dispersão atmosférica, subsidiando, assim, a adoção da grade mais adequada. Observou-se que os resultados quantitativos modelados para os pontos receptores discretos (PRD's) em cada uma das quatro configurações foram iguais entre si, ou seja, não variaram em função da utilização de uma grade mais ou menos refinada. Por outro lado, considerando tão somente os pontos receptores cartesianos (pontos receptores de grade), observou-se que as máximas concentrações obtidas em cada configuração variaram de uma configuração para outra, sendo que quanto mais refinada foi a grade maior foi a máxima concentração obtida considerando todo o domínio.

No que se refere à modelagem da qualidade do ar, foram definidos dois cenários, sendo eles: **i) “cenário 2015”**, que considerou as emissões de CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora, 24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), e MP_{2,5} (24 horas e anual), tendo como base as taxas de emissão disponibilizadas no inventário da FEAM, ano base 2015; e **ii) “cenário 2015 + 50%”**, que considerou as emissões dos mesmos poluentes, sendo eles o CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora, 24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), e MP_{2,5} (24 horas e anual), mas tendo como premissa um incremento hipotético de 50% nas taxas de emissão disponibilizadas no inventário da FEAM. Para cada cenário, foram considerados 20 pontos receptores discretos localizados no entorno do Aeroporto da Pampulha, além de também terem sido avaliados os resultados máximos nos pontos receptores de grade, por cenário, por poluente e por período de referência.

No que tange às máximas concentrações modeladas em todo o domínio, constatou-se, em ambos os cenários modelados, que os resultados de CO (8 horas e 24 horas), NO₂ (1 hora), SO₂ (24 horas e anual), PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual) e MP_{2,5} (24 horas e anual) estiveram em conformidade com os limites intermediários e finais previstos na Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023, bem como abaixo dos valores guia estabelecidos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS. As exceções foram observadas para concentrações associadas aos períodos de referência de 24 horas e anual do poluente NO₂, as quais apresentaram para a área interna do Aeroporto da Pampulha: **i)** concentrações no “cenário 2015” (81,013 µg.m⁻³) e “cenário 2015 + 50%” (99,608 µg.m⁻³) para o período de referência de 24 horas superiores ao padrão interino 2 (50 µg.m⁻³) e ao nível guia de qualidade do ar (25 µg.m⁻³) previstos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS; e **ii)** concentrações no “cenário 2015” (74,924 µg.m⁻³) e “cenário 2015 + 50%” (102,148 µg.m⁻³) para o período de referência anual superiores ao padrão interino 1 (40 µg.m⁻³), padrão interino 2 (30 µg.m⁻³), padrão interino 3 (20 µg.m⁻³) e nível guia de qualidade do ar (10 µg.m⁻³) previstos nas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS, bem como ao padrão intermediário 1 (60 µg.m⁻³), padrão intermediário 2 (50 µg.m⁻³), padrão intermediário 3 (45 µg.m⁻³) e padrão final (40 µg.m⁻³) da Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023.

No que tange especificamente aos pontos receptores discretos (PRD's), observou-se em ambos os cenários que as concentrações modeladas dos parâmetros PTS (24 horas e anual), MP₁₀ (24 horas e anual), MP_{2,5} (24 horas e anual), SO₂ (24 horas e anual) e CO (8 horas e 24 horas) estiveram integralmente abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e DN COPAM nº 248/2023, considerando os padrões intermediários 1, 2, 3 e o padrão final, assim como também estiveram abaixo dos valores guia estabelecidos pelas Diretrizes de 2021 da OMS, abrangendo os padrões interinos 1, 2, 3, 4 e o nível guia de qualidade do ar. Quando avaliado o NO_x, que foi assumido em sua totalidade como NO₂, observou-se que no “cenário 2015” o resultado modelado de NO₂ (anual) para o PRD 19 (14,527 µg.m⁻³) foi superior ao padrão final (AQG) da OMS (10 µg.m⁻³). Já no “cenário 2015 + 50%”, foram observadas concentrações de NO₂ (24 horas) iguais a 35,126 µg.m⁻³ no PRD 19 e 26,489 µg.m⁻³ no PRD 01, superiores, portanto, ao valor guia final da OMS (25 µg.m⁻³), ao passo que em relação às concentrações anuais modeladas de NO₂, foi

observada no PRD 19 uma concentração de $21,788 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, superior, portanto, aos limites do padrão interino 3 da OMS ($20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) e do valor guia final da OMS ($10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Diante do exposto, considerando as premissas assumidas e informações utilizadas na presente modelagem, observou-se que, em relação aos padrões da Resolução CONAMA nº 491/2018, DN COPAM nº 248/2023 e Diretrizes da OMS de 2021, não há potenciais de extrapolações nos pontos receptores discretos no que tange aos parâmetros PTS , MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$, SO_2 e CO . Por outro lado, se faz importante compreender melhor a dinâmica da dispersão atmosférica associada ao NO_2 , uma vez que este poluente apresentou resultados superiores a alguns padrões de referência.

7 RECOMENDAÇÕES

Como continuidade do presente trabalho, recomenda-se que seja realizada a atualização do inventário de emissões atmosféricas do Aeroporto da Pampulha, perpassando o mapeamento atual das fontes emissoras de poluentes atmosféricos e o levantamento *in situ* das taxas de emissão associadas a cada fonte, em especial no que se refere ao NO_x, de modo que seja elaborado um inventário mais fidedigno à realidade atual do empreendimento.

Além disso, sugere-se que, com base no inventário atualizado, recomendado anteriormente, bem como levando em conta que o processo de licenciamento não demandou um Estudo de Dispersão Atmosférica, seja elaborada uma nova modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos, levando em conta o novo inventário proposto, a atualização das condições meteorológicas e as atuais movimentações aeroportuárias, refletindo, assim, a realidade do Aeroporto da Pampulha.

Também é recomendada a estruturação e implementação de um plano de monitoramento capaz de avaliar a real dinâmica da dispersão dos poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha, sendo que este monitoramento também possuirá um papel importante na validação da modelagem realizada no âmbito do presente trabalho e no contexto de futuros estudos que venham a ser conduzidos. Neste sentido, também recomenda-se comparar os resultados obtidos a partir do monitoramento proposto frente aos dados modelados tanto neste trabalho quanto em futuros estudos que venham a ser conduzidos.

Por fim, sugere-se também avaliar, de forma conjunta, as emissões de poluentes atmosféricos oriundos do Aeroporto da Pampulha e de outras fontes externas e adjacentes ao empreendimento, por exemplo, as vias públicas onde há tráfego intenso de veículos, de modo que se possa avaliar os impactos sinérgicos destas emissões sobre a população local.

REFERÊNCIAS

- ABEAR. **Associação Brasileira das Empresas Aéreas**. 2023. Disponível em: <https://www.abear.com.br/imprensa/agencia-abear/noticias/impacto-economico-da-aviacao-no-turismo-contribuiu-com-r-78-bilhoes-para-o-pib-brasileiro-em-2022/>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- AGUILAR-GÓMEZ, J. A.; GARIBAY-BRAVO, V.; TZINTZUN-CERVANTES, G.; CRUZ-JIMATE, I.; ECHÁNIZ-PELLICER, G. Mobile source emission estimates using remote sensing data from Mexican cities. In: **ANNUAL INTERNATIONAL EMISSION INVENTORY CONFERENCE, COMPREHENSIVE INVENTORIES – LEVERAGING TECHNOLOGY AND RESOURCES**, 18., 2009, Baltimore, Maryland. Anais... Baltimore: U.S. EPA, 2009.
- AL-THANI, H.; KOÇ, M.; ISAFAN, R. J. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 27839, 2018.
- ANAC. **Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil**. 2013. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2014/01/inventario_aereo.pdf. Acesso em: 07 abr. 2024.
- ANAC. **Lista de aeródromos civis cadastrados**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/lista-de-aerodromos-civis-cadastrados>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- ARTER, C. A. ARTER, C. A.; BUONOCORE, J. J.; MONIRUZZAMAN, C.; YANG, D.; HUANG, J.; ARUNACHALAM, S. Air quality and health-related impacts of traditional and alternate jet fuels from airport aircraft operations in the US. **Environment International**, v. 158, p. 106958, 2022.
- ARUNACHALAM, S. *et al.* **Dispersion modeling guidance for airports addressing local air quality health concerns**. 2017.
- BAJGAI, D. P.; SHRESTHA, K. L. Evaluation of aircraft emission at Tribhuvan international airport and its contribution to air quality in Kathmandu, Nepal. **Atmospheric Environment: X**, v. 17, p. 100204, 2023.
- BELO HORIZONTE. Prefeitura de Belo Horizonte. **Fundação de Parques Municipais e Zoobotânica**. 2022. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/fundacao-de-parques-e-zoobotanica/conheca-os-parques>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- BERINGUI, K. *et al.* Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro. **Química Nova**, v. 44, p. 737-754, 2021.
- BRASIL. **Lei nº 14.850, de 03 de maio de 2024**. Brasília: Senado Federal, 2024. Seção 1, p. 2.
- BRASIL. Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986. **Código Brasileiro de Aeronáutica**. Brasília: Senado Federal, 1986.
- BRASIL. **Resolução ANP nº 65, de 12 de dezembro de 2011**. Brasília: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2011. Seção 1, p. 195.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 237, de 22 de novembro de 1997**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1997. Seção 1, p. 30841-30843.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 491, de 21 de novembro de 2018**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. Seção 1, p. 155.

CCR. **CCR Aeroportos. 2022**. Disponível em: <https://www.ccr aeroportos.com.br/pampulha-mg/sobre-o-aeroporto>. Acesso em: 02 nov. 2022.

CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016. 214 p.

CGNA. **Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Recursos. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2016**. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2016.pdf. Acesso em: 14 mai. 2023.

CGNA. **Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Recursos. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2017**. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2017.pdf. Acesso em: 06 abr. 2024.

CGNA. **Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Recursos. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2019**. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2019.pdf. Acesso em: 14 mai. 2023.

CGNA. **Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Recursos. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2021**. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2021.pdf. Acesso em: 06 abr. 2024.

CGNA. **Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Recursos. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2022**. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2022.pdf. Acesso em: 03 dez. 2022.

CGNA. **Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Recursos. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2023**. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2023.pdf. Acesso em: 06 abr. 2024.

DEFRA. **Revision to the Method of Estimating Emissions from Aircraft in the UK Greenhouse Gas Inventory**. Disponível em: https://uk-air.defra.gov.uk/library/reports?report_id=316. Acesso em: 21 abr. 2024.

DODSON, R. E.; HOUSEMAN, E. A.; MORIN, B.; LEVY, J. I. An Analysis of Continuous Black Carbon Concentrations In Proximity to an Airport and Major Roadways. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 24, p. 3764-3773, 2009.

EEA. **Domestic airport traffic (LTO-cycles < 1000 m altitude) Intern, 2006**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5/B851vs2.4.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2024.

FEAM. **Atualização do Inventário das Fontes de Emissão de Poluentes Atmosféricos da Região de Belo Horizonte, Contagem e Betim**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, 2018. Revisão: 00. Volume: 1. p. 553.

FEAM. **Orientações Técnicas para a Elaboração de um Estudo de Dispersão Atmosférica**. Nota Técnica n.º 02. Belo Horizonte, 2019.

GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

GRANTZ, D. A.; GARNER, J. H. B.; JOHNSON, D. W. Air quality and the effects of aerosols: A review. **Environment International**, v. 29, p. 213-234, 2003.

GROMA, V. O. *et al.* Verification of the EDMS model adapted to Budapest Liszt Ferenc Airport. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 63, n. 3, p. 137-153, 2018.

HAN, S. *et al.* Impact of nocturnal planetary boundary layer on urban air pollutants: Measurements from a 250-m tower over Tianjin, China. **Journal of hazardous materials**, v. 162, n. 1, p. 264-269, 2009.

HOLMES, N. S.; MORAWSKA, L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. **Atmospheric environment**, v. 40, n. 30, p. 5902-5928, 2006.

HSU, H.-H.; ADAMKIEWICZ, G.; HOUSEMAN, E. A.; ZARUBIAK, D.; SPENGLER, J. D.; LEVY, J. I. Contributions of aircraft arrivals and departures to ultrafine particle counts near Los Angeles International Airport. **Science Of the Total Environment**, v. 444, p. 347–355, 2013.

HUDDA, N.; DURANT, L. W.; FRUIN, S. A.; DURANT, J. L. Impacts of Aviation Emissions on Near-Airport Residential Air Quality. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 14, p. 8580–8588, 2020.

ICAO. **Aviation Benefits Report**. Montreal: ICAO, 2018. Disponível em: <https://www.icao.int/Meetings/FutureOfAviation/Pages/default.aspx>. Acesso em: 03 mar. 2024.

ICAO. **Aviation Benefits Report**. Montreal: ICAO, 2019. Disponível em: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2019-web.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2024.

IPHAN. **Patrimônio Mundial Cultural e Natural, 2022**. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/29>. Acesso em: 27 nov. 2022.

KOTTHAUS, S. *et al.* Atmospheric boundary layer height from ground-based remote sensing: a review of capabilities and limitations. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 16, n. 2, p. 433-479, 2023.

KOULIDIS, A. G.; PROGIOU, A. G.; ZIOMAS, L. C. Air Quality Levels in the Vicinity of Three Major Greek Airports. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 25, n. 6, p. 749-760, 2020.

KUZU, S. L. Estimation and dispersion modeling of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Atatürk International Airport. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 11, n. 2, p. 153-161, 2018.

LAKES. **AERMOD VIEW - Gaussian Plume Air Dispersion Model, 2022**. Disponível em: <https://www.weblakes.com/software/air-dispersion/aermod-view/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

LEELŐSSY, Á. *et al.* Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. **Central European Journal of Geosciences**, v. 6, n. 3, p. 257–278, 2014.

LI, J. *et al.* Aircraft emission inventory and characteristics of the airport cluster in the Guangdong–Hong Kong–Macao greater bay area, China. **Atmosphere**, v. 11, n. 4, p. 323, 2020.

MAKRIDIS, M.; LAZARIDIS, M. Dispersion modeling of gaseous and particulate matter emissions from aircraft activity at Chania Airport, Greece. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 12, n. 8, p. 933-943, 2019.

MARTINI, G.; SCOTTI, D.; VOLTA, N. Including local air pollution in airport efficiency assessment: A hyperbolic-stochastic approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 24, p. 27-36, 2013.

MASIOL, M.; HARRISON, R. M. Aircraft Engine Exhaust Emissions and Other Airport-related Contributions to Ambient Air Pollution: A Review. **Atmospheric Environment**, v. 95, p. 409–455, 2014.

MELO, A. M. V. **Avaliação de Desempenho dos Modelos AERMOD e CALPUFF Associados ao Modelo PRIME**. 2011. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo. Orientadora: Jane Meri Santos.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 217, de 06 de dezembro de 2017**. Diário do Executivo, Minas Gerais, 08 dez. 2017.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 248, de 23 de novembro de 2023**. Diário do Executivo, Minas Gerais, 08 dez. 2023.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 09 de setembro de 2004**. Diário do Executivo, Minas Gerais, 09 set. 2004.

MINAS GERAIS. **Unidade PPP. Concessões e Parcerias. Aeroporto da Pampulha, 2022**. Disponível em: <http://www.ppp.mg.gov.br/projetos/contratos-assinados/aeroporto-da-pampulha>. Acesso em: 27 nov. 2022.

MIRAGLIA, S. G. E. K.; GOUVEIA, N. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, p. 4141-4147, 2014.

MOKHTAR, M. M.; HASSIM, M. H.; TAIB, R. M. Health risk assessment of emissions from a coal-fired power plant using AERMOD modelling. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 92, n. 5, p. 476-485, 2014.

MORADI, H.; SHAFABAKHSH, G.; NADERAN, A. Effect of airport pollution on airport cities and air quality of the area (case study: Imam Khomeini international airport). **Journal of Transport & Health**, v. 34, p. 101729, 2024.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R. Meteorologia e poluição atmosférica. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, p. 1-13, 2008.

MULYA, S.; SUHERMAN, S.; NATSIR, T. A. Dispersion model and impact assessment of Landing and Take Off (LTO) activity at New Yogyakarta International Airport using AERMOD. **Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi**, v. 15, n. 1, p. 33-44, 2023.

OMS. **WHO global air quality guidelines, 2022**. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 nov. 2022.

PANDEY, G.; VENKATRAM, A.; ARUNACHALAM, S. Modeling the air quality impact of aircraft emissions: is area or volume the appropriate source characterization in AERMOD?. **Air Quality, Atmosphere & Health**, p. 1-10, 2024.

PANDEY, G.; VENKATRAM, G.; ARUNACHALAM, S. Evaluating AERMOD with measurements from a major US airport located on a shoreline. **Atmospheric Environment**, v. 294, p. 119506, 2023.

PENN, S. L. *et al.* A comparison between monitoring and dispersion modeling approaches to assess the impact of aviation on concentrations of black carbon and nitrogen oxides at Los Angeles International Airport. **Science of the Total Environment**, v. 527, p. 47-55, 2015.

PERRY, S. G. *et al.* AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 5, p. 694-708, 2005.

PINHEIRO, J. M.; VENTURI, L. A. B.; GALVANI, E. Poluição atmosférica: estudo de caso do Município de São Luís do Maranhão. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 760-771, 2022.

PÖSCHL, U. Atmospheric chemistry: new concepts and tools in air quality research. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 5, p. 7520-7532, 2005.

SCHLENKER, W.; WALKER, W. R. Airports, air pollution, and contemporaneous health. **The Review of Economic Studies**, v. 83, n. 2, p. 768-809, 2016.

SCHÜRMAN, G. *et al.* The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich Airport. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 103-118, 2007.

SEIBERT, P. *et al.* Mixing layer depth determination for dispersion modelling. In: FISHER, B. *et al.* (Ed.). **Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models: final report COST Action 710**. Luxembourg: European Commission, p. 1-234, 1998.

SEIBERT, P. *et al.* Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 7, p. 1001-1027, 2000.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

SHIRMOHAMMADI, F. *et al.* Chemical composition and redox activity of PM_{0.25} near Los Angeles International Airport and comparisons to an urban traffic site. **Science of The Total Environment**, v. 610, p. 1336-1346, 2018.

SIAM. **Elaboração de estudos ambientais para fins de licenciamento operacional corretivo do Aeroporto Carlos Drummond de Andrade e assessoramento técnico visando o atendimento das demandas decorrentes dos programas ambientais propostos, 2011.** Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/siam/lc/2011/0593720090012011/4786892011.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2024.

SIMONETTI, I.; MALTAGLIATI, S.; MANFRIDA, G. Air quality impact of a middle size airport within an urban context through EDMS simulation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 40, p. 144-154, 2015.

SNOUN, H.; KRICHEN, M.; CHÉRIF, H. A comprehensive review of Gaussian atmospheric dispersion models: current usage and future perspectives. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, p. 1-24, 2023.

STIRNBERG, R. *et al.* Meteorology-driven variability of air pollution (PM₁) revealed with explainable machine learning. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 5, p. 3919-3948, 2021.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 666, 1988.

SUJATHA, P. *et al.* Ventilation coefficient and boundary layer height impact on urban air quality. **Cogent Environmental Science**, v. 2, n. 1, p. 1125284, 2016.

TABATCHEIK, A. S. Crise climática: caminhos para enfrentar seus efeitos nas habitações em Curitiba. **Cadernos Metrópole**, v. 25, p. 947-967, 2023.

TARTAKOVSKY, D.; BRODAY, D.; STERN, E. Evaluation of AERMOD and CALPUFF for predicting ambient concentrations of total suspended particulate matter (TSP) emissions from a quarry in complex terrain. **Environmental Pollution**, v. 179, p. 138-145, 2013.

TOKUSLU, A. Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport. **Energy**, v. 206, p. 118219, 2020.

USEPA. **AERMOD implementation guide**. Research Triangle Park, NC: EPA-454/B-23-009, U.S. Environmental Protection Agency, 2023a.

USEPA. **AERMOD model formulation**. Research Triangle Park, NC: EPA-454/B-23-010, U.S. Environmental Protection Agency, 2023b.

USEPA. **Air quality dispersion modeling - preferred and recommended models**. Disponível em: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>. Acesso em: 17 out. 2023. 2023c.

USEPA. **Guideline on air quality models**. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-10/appw_23_2023-22876.pdf. Acesso em: 22 abr. 2023. 2023d.

USEPA. Revision to the guideline on air quality models: adoption of a preferred general purpose (flat and complex terrain) dispersion model and other revisions; final rule. **Federal Register**, v. 70, n. 216, p. 68218-68261, 2005.

YILMAZ, İ. Emissions from passenger aircraft at Kayseri Airport, Turkey. **Journal of Air Transport Management**, v. 58, p. 176-182, 2017.

ZHOU, Y.; LEVY, J. I. Between-airport heterogeneity in air toxics emissions associated with individual cancer risk thresholds and population risks. **Environmental Health**, v. 8, p. 1-11, 2009.