

Modelagem de dispersão das emissões veiculares de NO₂ e CO no entorno da Avenida Beira Mar Norte em Florianópolis/SC

Andy de Sousa Maes

Andy de Sousa Maes

**MODELAGEM DE DISPERSÃO DAS EMISSÕES VEICULARES
DE NO₂ E CO NO ENTORNO DA AVENIDA BEIRA MAR
NORTE EM FLORIANÓPOLIS/SC**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para a
Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo
Hoinaski

Coorientador: Prof. Dr. Henrique de
Melo Lisboa

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Maes, Andy de Sousa

Modelagem de dispersão das emissões
veiculares de NO₂ e CO no entorno da Avenida
Beira Mar Norte em Florianópolis/SC / Andy de
Sousa Maes ; orientador, Leonardo Hoinaski ;
coorientador, Henrique de Melo Lisboa -
Florianópolis, SC, 2017.

101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.
Emissões veiculares. 3. Qualidade do ar. 4.
Modelagem de dispersão atmosférica. 5. AERMOD.
I. Hoinaski, Leonardo. II. de Melo Lisboa,
Henrique. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental. IV. Título.

Andy de Sousa Maes

**MODELAGEM DE DISPERSÃO DAS EMISSÕES VEICULARES
DE NO₂ E CO NO ENTORNO DA AVENIDA BEIRA MAR
NORTE EM FLORIANÓPOLIS/SC**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

Florianópolis, 10 de março de 2017.



Prof. Dr. Leonardo Hoinaski
Orientador

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Davide Franco
Membro da Banca



Prof. MSc. Marlon Brancher
Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Rita e Paulo por proporcionarem um ambiente familiar repleto de amor, onde a dedicação aos estudos sempre foi incentivada.

Às minhas irmãs Stephanie e Caroline, que influenciaram diretamente no meu crescimento e amadurecimento, sou grata por todo o companheirismo ao longo da minha vida.

À Marjana Cavalleri, que como amiga e colega me acompanhou por todos os anos da graduação. Sem a sua generosidade e companheirismo, a minha experiência na Universidade não teria sido a mesma.

Ao Matheus Fedrigo, que durante a elaboração deste trabalho sempre me fez companhia, incentivou e me apoiou frente aos desafios que encontrei. Agradeço por todo o carinho.

Ao meu orientador Leonardo Hoinaski pela paciência, entusiasmo e ensinamentos do início ao fim deste trabalho. Também aproveitei este momento para demonstrar admiração pelo seu trabalho como professor e como pesquisador.

Ao meu co-orientador Henrique de Melo Lisboa, pela oportunidade e por todos os anos de contribuição ao laboratório que recentemente me acolheu como estagiária, o LCQAr.

À minha banca, Professor Davide Franco e Marlon Brancher, por terem aceito o convite tão prontamente, e pelo trabalho atencioso em revisar e contribuir com este TCC.

À Melissa Fernandes, pelo estudo de emissões veiculares que propiciou a elaboração deste trabalho.

A todos os amigos que estiveram presentes durante a graduação, tornando esta jornada mais recompensadora, muito obrigada!

RESUMO

A poluição atmosférica é uma grande preocupação em todo o mundo, tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento. Em grandes centros urbanos, parte significativa da poluição do ar é atribuída às emissões veiculares. O maior representante de emissões de veículos leves é o monóxido de carbono (CO); e dos pesados, os óxidos de nitrogênio (NO_x). Face a iminente necessidade de avaliar impactos de fontes de poluição na qualidade do ar, este trabalho objetiva simular concentrações de CO e NO₂ devido as emissões veiculares na Avenida Beira Mar Norte, em Florianópolis/SC. Para tanto, o modelo de dispersão AERMOD foi utilizado para prever os níveis dos poluentes no entorno da rodovia. Duas tipologias de fonte foram adotadas para descrever as emissões veiculares: pontuais e área. A abrangência e incidência de casos que excedem os padrões de qualidade do ar definidos na legislação brasileira CONAMA 003/1990 foram investigados. As fontes pontuais obtiveram concentração máxima horária de NO₂ igual a 670,9 µg/m, excederam o padrão primário de qualidade do ar 1519 vezes, em uma área igual a 11,99 hectares (ha); e o padrão secundário, 4152 vezes, em 45,18 ha. As fontes área apresentaram concentração máxima horária igual a 875,7 µg/m³, excederam ao padrão primário 3386 vezes abrangendo 88,04 ha; e o secundário teve 9074 ocorrências de não conformidade, em uma área igual a 303,86 ha. Em contrapartida, os padrões para o CO não ultrapassaram o limite estabelecido pela legislação brasileira, alcançando concentrações máximas horárias de 3.528,68 e 4.608,85 µg/m³, nas configurações pontual e área, respectivamente. As concentrações de NO₂ simuladas excederam consideravelmente os padrões de qualidade do ar brasileiros devido as emissões veiculares. Diante desse cenário, a elaboração de um inventário de fontes de poluição atmosférica em Florianópolis é desejável. Consequentemente, uma avaliação de impacto na qualidade do a partir da combinação das diferentes fontes poderia ser conduzida, onde medidas de controle para prevenção e mitigação poderiam ser adotadas.

Palavras-chave: Emissões veiculares. Qualidade do ar. Modelagem de dispersão atmosférica. *AERMOD*.

ABSTRACT

Air pollution has been recognized as one of the worst environmental health risk at the present time. Therefore its sources, dispersion and effects has been object of study and concern in developed and developing countries. For this reason, air pollution emission limits and air quality standards have been established in countries all over the world, in order to prevent and mitigate the worsening of public health and well-being. In Brazil, these standards have been established by the CONAMA Resolution No. 03 /1990. In large urban areas, a significant parcel of outdoor air pollution comes from mobile sources emissions. The biggest representant of light weight vehicle emissions is carbon monoxide; for heavy weight vehicles, nitrogen oxides are. In this sense, the present work aims to analyze impacts caused by vehicular emissions of CO and NO₂ in the surroundings of Beira Mar Norte Avenue, in Florianópolis / SC. Because the concentrations emitted by vehicles are transported and transformed through the atmosphere, the *AERMOD* mathematical modeling software was used to simulate pollutant concentrations at the receptor location. Two settings were tested in order to describe vehicular sources: point and area source options. Then it was verified the affected area and incidence of cases exceeding Brazilian legislation, to both of the sources and both of the pollutants (CO and NO₂). As a result, the highest 1-hour concentration found for NO₂ point sources was 670.9 µg/m³, the primary standard was exceeded in 1519 occasions, comprehending 11,99 ha; and the secondary standard, 4152 times, in 45,18 ha. For area sources, the highest 1-hour concentration found was 670.9 µg/m³, the primary standard was violated in 3386 occasions, comprehending 88.04 ha; and the secondary standard, 9074 times, in 303,86 ha. On the other hand, CO legislation standards were not exceeded, reaching maximum hourly concentrations of 3,528.68 and 4,608.85 µg / m³, for point and area configurations, respectively. It was found that NO₂ concentrations were able to exceed Brazilian legislation, even though only vehicular emissions were considered. Considering the stated scenario, the elaboration of a pollution emission detailed inventory is essential in Florianópolis, enabling a combined analysis of all sources and the adoption of air quality control measures.

Keywords: Vehicle emissions. Air quality. Atmospheric dispersion models. *AERMOD*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: emissões relativas por tipo de fonte na Região Metropolitana de São Paulo.....	39
Figura 2: Fluxo de dados do <i>AERMOD Modeling System</i>	46
Figura 3: mapa de localização da Avenida Beira Mar Norte.....	50
Figura 4: Fluxo de dados no pré-processador AERMET.....	52
Figura 5: Rosa dos ventos referente aos dados meteorológicos do período entre 01/01/2015 e 31/12/2015.....	54
Figura 6: Mapa de setorização dos entornos da Avenida Beira-Mar Norte, em Florianópolis/SC, utilizado para a definição dos usos da superfície.....	56
Figura 7: Fluxo de dados no pré-processador <i>AERMAP</i>	58
Figura 8: Modelo digital de elevação de Florianópolis, nos entornos da Avenida Beira Mar Norte.....	59
Figura 9: Distribuição das 109 fontes pontuais ao longo da Avenida Beira Mar Norte.....	61
Figura 10: Traçado dos polígonos ao longo das três vias da Avenida Beira Mar Norte.....	62
Figura 11: Concentrações máximas de NO ₂ para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes pontuais.....	67
Figura 12: Concentrações máximas de NO ₂ para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes área.....	68
Figura 13: Concentrações médias aritméticas anuais de NO ₂ , provenientes de fontes pontuais.....	69
Figura 14: Concentrações médias aritméticas anuais de NO ₂ , provenientes de fontes área.....	70
Figura 15: Número de vezes em que o padrão primário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO ₂ emitido por fontes pontuais, foi excedido em um ano.....	71
Figura 16: Número de vezes em que o padrão secundário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO ₂ emitido por fontes pontuais, foi excedido em um ano.....	72
Figura 17: Número de vezes em que o padrão primário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO ₂ emitido por fontes área, foi excedido em um ano.....	73
Figura 18: Número de vezes em que o padrão secundário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO ₂ emitido por fontes área, foi excedido em um ano.....	74
Figura 19: Concentrações máximas de CO para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes pontuais.....	78

Figura 20: Concentrações máximas de CO para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes área. 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões nacionais primários e secundários de qualidade do ar.	35
Tabela 2: Níveis de poluentes atmosféricos que compõem um Episódio Crítico de Poluição do Ar.....	36
Tabela 3: Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde.....	36
Tabela 4: Valores limite estabelecidos pela Comissão Européia.	37
Tabela 5: Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela US EPA. ...	38
Tabela 6: Relação entre a qualidade do ar e os efeitos epidemiológicos correspondentes, para os poluentes CO e NO ₂	40
Tabela 7: Taxa total de emissão de poluentes provenientes dos veículos que transitaram na Av. Beira Mar-Norte, entre 14/12/2010 e 20/12/2010.	51
Tabela 8: condições meteorológicas médias durante o ano de 2015.	53
Tabela 9: Parâmetros de superfície conforme o uso, correspondentes à estação da Primavera.	55
Tabela 10: Parcela de ocupação para cada uso da superfície, em cada setor.	56
Tabela 11: Valores de albedo, razão de Bowen e Rugosidade para cada setor da área de estudo.	57
Tabela 12: Taxa de emissão de CO e NO ₂ dividida entre cada uma das fontes localizadas na Avenida Beira Mar Norte.....	60
Tabela 13: Taxa de emissão de CO e NO ₂ dividida pela área total dos polígonos traçados sobre as três vias da Avenida Beira Mar Norte.	62
Tabela 14: Padrões nacionais primários e secundários de qualidade do ar para os poluentes dióxido de nitrogênio e monóxido de carbono	63
Tabela 15: resumo das concentrações máximas encontradas, áreas que excedem aos padrões primários e secundários e número de ocorrências que extrapolam os padrões ao longo do ano, para o cenário pontual e área.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AERMIC – American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model Improvement Committee
Art. – Artigo
Av. – Avenida
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CERC – Cambridge Environmental Research Consultants
CH₄ – Metano
CO – Monóxido de Carbono
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVNM – Compostos orgânicos voláteis não-metânicos
EPA ORD – Environmental Protection Agency Office of Research and Development
EPAGRI/CIRAM – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural / Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
DTECEA – Destacamento de Controle Aéreo
GLP – Gás liquefeito de petróleo
HPA – Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
MAA – Média aritmética anual
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MP₁₀ – Material particulado com diâmetro aerodinâmico menor do que 10 µm
MP_{2,5} – Material particulado com diâmetro aerodinâmico menor do que 2,5 µm
NH₃ – Amônia
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
NO₂ – Dióxido de Nitrogênio
OMS – Organização Mundial da Saúde
PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT – Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo
SC – Santa Catarina
SO₂ – Dióxido de Enxofre
SO_x – Óxidos de Enxofre
UNEP – United Nations Environment Programme

USEPA – United States Environmental Protection Agency
UTM – Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS.....	26
1.1.1	Objetivo Geral.....	26
1.1.2	Objetivos Específicos.....	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM CENTROS URBANOS..	27
2.1.1	Emissões veiculares.....	28
2.1.2	Inventário de emissões veiculares.....	30
2.2	LEGISLAÇÕES PARA O CONTROLE DA QUALIDADE DO AR	31
2.2.1	Controle da emissão de poluentes atmosféricos por fontes móveis.....	32
2.2.2	Padrões de qualidade do ar.....	33
2.2.3	Padrões de qualidade do ar no Brasil	34
2.2.4	Padrões de qualidade do ar internacionais.....	36
2.2.1	Relação entre emissões veiculares, qualidade do ar e efeitos epidemiológicos.....	38
2.3	MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES	40
2.3.1	Modelos utilizados para analisar a dispersão de emissões veiculares	42
2.3.2	Por que utilizar o AERMOD?	43
2.3.3	Como funciona o AERMOD?	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	49
3.2	DADOS DE ENTRADA DO AERMOD	50
3.2.1	Emissões de CO e NO ₂	50
3.2.2	Pré-processamento de dados meteorológicos	52
3.2.3	Pré-processamento de dados do terreno.....	57
3.3	CENÁRIOS E EVENTOS TESTADOS	60
3.3.1	Fontes pontuais	60
3.3.2	Fontes área	61
3.3.3	Eventos.....	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	DISPERSÃO DE NO ₂ NA AVENIDA	65

4.2	DISPERSÃO DE CO NA AVENIDA	77
5	CONCLUSÕES.....	81
6	RECOMENDAÇÕES.....	83
	REFERÊNCIAS.....	85
	ANEXO A - RELAÇÃO ENTRE QUALIDADE DO AR, CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES E SEUS EFEITOS EPIDEMIOLÓGICOS.....	93
	ANEXO B - EMISSÕES VEICULARES DE CO E NO ₂ NA AV. BEIRA MAR NORTE, DE ACORDO COM O TIPO E IDADE DO VEÍCULO, DE 0 A 20 OU MAIS ANOS	95
	ANEXO C - SÍNTESE DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO ANO 2015.....	97
	ANEXO D - DIVISÃO DOS BAIRROS DE FLORIANÓPOLIS/ SC.....	99
	APÊNDICE A - COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

Os veículos automotores representam uma importante forma de locomoção para as sociedades contemporâneas. Em centros urbanos adensados a crescente utilização deste meio de transporte fez emergir preocupações a respeito das emissões de poluentes atmosféricos pela frota veicular. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição do ar ambiente causou cerca de 3,7 milhões de mortes prematuras em 2012, trazendo à tona a necessidade de investigar as principais fontes de poluição atmosférica, de modo a buscar formas efetivas de redução das emissões (UNEP, 2014).

Devido a representatividade das emissões de veículos automotores em comparação ao total emitido para a atmosfera, desenvolveram-se técnicas para quantificar essas contribuições. Estima-se que na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), segundo o relatório da CETESB do ano de 2015, das emissões atmosféricas totais em 2014, os veículos foram responsáveis pela emissão de 97,5% de monóxido de carbono (CO), 79% de hidrocarbonetos (HC), 67,5% de óxidos de nitrogênio (NO_x), 21,8% de óxidos sulfúricos (SO_x), e quanto aos materiais particulados (MP), 40% de MP₁₀ e 37% de MP_{2,5} (CETESB, 2015).

Todavia, a concentração de poluentes emitidos pela fonte não é a mesma que chega aos receptores. Ao invés, as emissões alcançam os receptores sendo transportadas e transformadas na atmosfera (VALLERO, 2008). Portanto, não apenas as concentrações emitidas necessitam ser estudadas, como também o fenômeno da dispersão atmosférica deve ser foco de pesquisas.

Em Florianópolis/SC, 96 % do total da população é urbana (IBGE, 2010), e a utilização de veículos automotores é intensa, representando uma frota de 334.521 veículos (DENATRAN, 2016). Percebe-se, portanto, que grande parte das pessoas vivem e transitam próximas às fontes de poluição atmosférica. Por este motivo esta pesquisa foi realizada na cidade de Florianópolis/SC, em uma localidade com intenso fluxo de veículos e pedestres, a Avenida Beira Mar Norte.

Neste contexto, o objetivo principal do presente trabalho foi avaliar o impacto na qualidade do ar da emissão dos poluentes atmosféricos NO₂ e CO, emitidos majoritariamente por veículos segundo a CETESB (2015). Para tanto, empregou-se o modelo *Aermod Modeling System (AERMOD)*, v. 15181, para simular a dispersão dos poluentes nos entornos da Avenida Beira Mar Norte, em Florianópolis. Após, as concentrações nos entornos da Avenida Beira Mar Norte foram comparadas aos padrões estabelecidos através da Resolução CONAMA N. 003/1990. Ainda foram comparados

os resultados fornecidos por diferentes configurações do modelo: a primeira que considera as emissões veiculares como fontes pontuais; e a segunda, que admite as fontes como área.

Os dados de emissões veiculares utilizados neste trabalho provêm do estudo de Fernandes (2014). O trabalho citado foi elaborado com o apoio do Laboratório de Qualidade do Ar – LCQAr, pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, coordenado pelo Professor Dr. Henrique de Melo Lisboa. Na ocasião de conclusão do estudo de Fernandes propôs-se que a continuidade da estimativa dos poluentes emitidos pelos veículos fosse a avaliação da dispersão dos mesmos na atmosfera.

Neste sentido, a modelagem matemática das emissões veiculares na Avenida Beira Mar Norte justificou-se por produzir uma análise da contribuição das emissões veiculares dissociada das outras fontes de poluição. Além disso, haja vista que as fontes veiculares são numerosas, a modelagem das emissões veiculares também justificou-se por ser a forma mais viável de estudar a dispersão dos poluentes na Avenida.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto na qualidade do ar das emissões veiculares de NO_2 e CO no entorno da Avenida Beira Mar Norte, utilizando o modelo de dispersão *AERMOD*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estimar as concentrações de NO_2 e CO baseado nos dados de emissão veicular de Fernandes (2014);
- Comparar as concentrações de NO_2 e CO previstas com os padrões de qualidade do ar brasileiros;
- Comparar o desempenho do *AERMOD* na estimativa de concentrações de NO_2 e CO utilizando configuração de fontes pontuais e área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica é organizada do conceito mais amplo ao mais específico. De acordo com Shen (1985), a poluição atmosférica é função de três elementos identificáveis: a fonte dos poluentes, o transporte destes poluentes, e os receptores. Para que o impacto seja avaliado, portanto, estes três elementos devem ser compreendidos (SHEN, 1985).

Inicialmente, uma breve apresentação sobre a poluição atmosférica em centros urbanos é apresentada. Em seguida, a revisão bibliográfica avança para a discussão da fonte de poluição em questão: emissões veiculares. Neste tópico, apontam-se os poluentes que compõem essa modalidade, bem como os fatores que interferem nas taxas de emissão dos veículos. Ainda em relação às fontes, aborda-se como ocorre a quantificação dos poluentes emitidos no tópico “Inventário de emissões veiculares”.

Posteriormente, no que tange o elemento receptores, padrões de qualidade do ar nacionais e internacionais selecionados e os efeitos epidemiológicos da poluição causada por veículos automotores são apresentados.

Finalmente, o transporte dos poluentes na atmosfera é abordado através de uma revisão sobre modelos matemáticos de dispersão. Um item sobre os modelos utilizados para avaliar a dispersão de emissões veiculares é incluído, através do qual uma comparação sucinta entre as opções disponíveis é disponibilizada. No mesmo item, o princípio básico de funcionamento do modelo *AERMOD* é apresentado.

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM CENTROS URBANOS

Em 2014, a United Nations Environment Programme (UNEP) apontou a poluição atmosférica como o pior risco para a saúde ambiental do mundo na atualidade. Segundo o relatório do programa, não somente a poluição ambiental representa riscos sociais, econômicos e ambientais insustentáveis; mas também está relacionada às causas de óbito, e ainda figura como um desafio transfronteiriço. Por estes motivos, a organização defendeu que o investimento na implementação de políticas efetivas de controle da poluição atmosférica é menos oneroso aos países, do que permitir que a qualidade do ar piore ainda mais (UNEP, 2014).

Na maioria das cidades onde monitora-se a qualidade do ar, os parâmetros não vão de encontro aos padrões estabelecidos pela OMS. A população destes centros urbanos tem maior risco de apresentar agravos de saúde como derrames cerebrais, doenças do sistema circulatório,

câncer de pulmão e doenças respiratórias agudas e crônicas. O custo da poluição atmosférica para os países mais desenvolvidos do mundo, mais a Índia e a China, foi estimado em 3,5 trilhões de dólares por ano, gastos com a saúde da população (UNEP, 2014).

Para compreender a relação estabelecida entre o meio atmosférico e a saúde e o bem-estar humano, primeiramente é necessário entender em quais cenários o ambiente pode ser visto como poluído ou saudável. Neste sentido, Daly e Zannetti (2007) definiram poluição atmosférica como a presença de substâncias emitidas ao ar por fonte antropogênica, biogênica ou geogênica; que não fazem parte da composição natural da atmosfera, ou que estejam presentes em concentrações superiores ao natural; e que possam causar efeitos adversos a curto ou longo prazo. Percebe-se, desta forma, que a definição do termo preocupa-se com a fonte, composição, concentração e os efeitos que a poluição atmosférica abrange. Sendo estes fatores de importante relevância para os estudos de poluição atmosférica (DALY e ZANNETTI, 2007).

2.1.1 Emissões veiculares

Em grandes cidades, as emissões veiculares figuram como uma das principais fontes de poluição atmosférica, e se tornaram um grande desafio para a fiscalização e controle ambiental. As emissões do transporte viário originam-se da combustão de gasolina, diesel, gás liquefeito proveniente do petróleo (GLP) e gás natural em motores de combustão interna. Resultando, desta forma, em emissões para a atmosfera como (European Environment Agency, 2013):

- Precusores do Ozônio (O_3): Monóxido de Carbono (CO), óxidos de nitrogênio NO_x , e compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM);
- Compostos agravadores do efeito estufa: gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O);
- Substâncias com efeito acidificante ao meio: amônia (NH_3) e dióxido de enxofre (SO_2);
- Material particulado (MP);
- Compostos carcinogênicos: Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA).

Diversos fatores interferem na quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera. Considera-se, de maneira geral, que o tipo de veículo, o

combustível utilizado, as condições ambientais e a estrutura viária, além da forma de condução do veículo são fatores importantes a serem considerados (ZHANG, 2013). Os principais fatores de influência são o tipo de veículo, combustível utilizado e deteriorização, conforme explicados a seguir:

- **Tipo de veículo:** a classificação dos veículos automotores no Brasil foi estabelecida pela Resolução CONAMA Nº 015/1995. De acordo com esta Resolução, os veículos podem ser classificados em veículos leves de passageiros, leves comerciais, veículos com características especiais para uso fora da estrada, e veículos pesados. Inclui-se desta forma, como a parcela da frota leve de passageiros, os automóveis com massa total de até 3856 kg, para o transporte de até 12 passageiros. Quanto aos veículos leves comerciais, podem transportar a mesma massa em kg do que os leves de passageiros, com a diferença de que podem transportar também cargas. Já os veículos com adaptações para uso fora da estrada, possuem tração nas quatro rodas, ângulos de ataque, saída e transposição de rampa definidos, e altura livre do solo também definida. Por fim, os veículos pesados podem carregar acima de 3856 kg de carga e/ou passageiros (BRASIL, 1995).
- **Combustível utilizado:** no Brasil, os principais combustíveis utilizados em veículos leves são o etanol e a gasolina, sendo esta mais amplamente utilizada. Enquanto nos veículos pesados, o diesel é o combustível mais utilizado (CETESB, 2015). O combustível utilizado nos veículos está diretamente ligado ao tipo de ignição do motor. As duas principais tecnologias de motores são conhecidas como Ciclo Otto e Ciclo Diesel. Quanto ao primeiro, inclui os automóveis, motocicletas, e a maioria dos veículos comerciais leves; já o segundo, abrange majoritariamente os caminhões e ônibus. No ciclo Otto, o combustível é misturado com ar após submeter-se à compressão nos cilindros, e a ignição é iniciada por uma centelha. Já nos motores de ciclo Diesel, a combustão acontece com a auto-ignição do combustível após a sua injeção e mistura com o ar, devido à compressão no interior dos cilindros. Comparado com os automóveis movidos à gasolina, os veículos à diesel emitem menos monóxido de carbono e hidrocarbonetos, enquanto há uma maior emissão de óxidos de nitrogênio (FAIZ et al., 1996).

- **Deteriorização dos veículos:** este é um importante fator de interferência nas emissões, visto que os veículos mais novos apresentam tecnologias de otimização do uso de combustíveis mais eficientes. Além disso, os mecanismos de controle de emissão presentes nos automóveis deterioram com o passar do tempo e a intensidade de uso, por este motivo, veículos mais antigos são conhecidos como “veículos com alta emissão” (SPITZLEY et al, 2005).

2.1.2 Inventário de emissões veiculares

O inventário de emissões é uma lista da quantidade de poluentes emitidos ao ar, por todas as fontes, em um determinado período, em área de limites fixos. Desta forma o inventário pode apontar as fontes de emissão mais representativas. Além disso, esta ferramenta pode ser usada em modelos matemáticos para determinar o grau de controle necessário para se alcançar padrões de qualidade do ar (VALLERO, 2008).

Em um aspecto mais geral, podem-se entender os inventários como instrumentos estratégicos de gestão ambiental, que orientam adoção de medidas de intervenção dependendo da sua escala de aplicação. Para tanto, esta ferramenta identifica e hierarquiza diferentes fontes, identifica os principais poluentes emitidos, permite avaliar efeitos de medidas de controle sobre as taxas de emissão, restitui séries históricas e determina tendências futuras, além de permitir estimar efeitos de emissões atmosféricas na qualidade do ar (BRASIL, 2011).

Os métodos de estimativa de emissão podem conter erros de precisão, no entanto as outras formas de quantificar poluentes também carregam erros e podem mostrar-se onerosas. A primeira alternativa seria monitorar continuamente cada fonte na área de estudo, inviável no caso de emissões veiculares. E a segunda, seria monitorar continuamente a qualidade do ar ambiente em muitos pontos, e aplicar equações que calculem as emissões a partir da concentração de poluente dispersa no ar (VALLERO, 2008). Na prática as duas alternativas para estimar emissões podem tornar-se difíceis quando muitas fontes, ou muitos pontos da área de estudo precisam ser monitorados, em um longo período de tempo, como é o caso dos poluentes emitidos por veículos automotores.

Para estimar a emissão de poluentes, atualmente duas abordagens são bem consolidadas: a metodologia *Top-Down*, que utiliza o consumo de combustível para determinar as emissões; e a *Bottom-Up*, que usa a quilometragem percorrida: A escolha da metodologia depende dos tipos

de dados disponíveis, da escala de aplicação e dos objetivos. A seguir, apresentam-se as diferenças de aplicação das duas alternativas:

a) Metodologia *Top-Down*

A metodologia *Top-Down* determina as emissões de forma abrangente, a partir do potencial de poluição específico ao combustível utilizado, sem considerar a tecnologia ou forma de utilização da fonte energética. Esta é uma abordagem mais indicada para a aplicação em macroescala, pois considera fatores de emissão mais abrangentes, como médias. Sobre esta metodologia, descreve-se a Fórmula 1 (BRASIL, 2011):

$$E_p = \sum C_c FE_{pc} \quad (1)$$

em que E_p é a emissão para o poluente p , C_c é a quantidade de combustível c (em unidades de volume de combustível), e FE_{pc} é o fator de emissão para cada combustível c e poluente p (em massa de poluente/volume de combustível).

b) Metodologia *Bottom-Up*

Esta abordagem considera tanto a tecnologia, como a forma de utilização e ocorrência espacial das emissões. Devido aos fatores de emissão mais específicos, indica-se para aplicação em escala local, permitindo, inclusive, caracterizar emissões em rodovias. Esta metodologia pode ser descrita pela Fórmula 2 (BRASIL, 2011):

$$E_p = \sum N_{ic} X FE_{pic} X D \quad (2)$$

onde E_p é a emissão do poluente p , N_{ic} é o número de veículos da frota do ano-modelo i e combustível c , FE_{pic} corresponde ao fator de emissão para o ano-modelo i , combustível c e poluente p .

2.2 LEGISLAÇÕES PARA O CONTROLE DA QUALIDADE DO AR

A legislação brasileira, no que tange o controle da qualidade do ar, possui três abordagens de regulamentação: padrões de qualidade em ar

ambiente, o controle de emissões atmosféricas provenientes de fontes fixas, e o controle das emissões por fontes móveis.

No Brasil, os primeiros esforços em regulamentar a poluição ambiental surgiram através de decretos, e se preocupavam mais com fontes industriais, estabelecendo regras de zoneamento e limitações de uso aos seus entornos. Em 31 de agosto de 1981 que a qualidade do ar foi abordada de forma mais abrangente e detalhada, quando a Lei N. 6.938 veio estabelecer a Política Nacional do Meio Ambiente. Esta lei foi resposta às pressões decorrentes da Conferência das Nações Unidas sobre o Homem e o Meio Ambiente, realizada em Estocolmo, em 1972 (PEREIRA JÚNIOR, 2007).

A Lei N. 6.938/81 atribui ao CONAMA, entre outras competências, a de “*estabelecer, privativamente, normas e padrões nacionais de controle da poluição por veículos automotores, aeronaves e embarcações, mediante audiência dos ministérios competentes*” (art. 8º, inciso VI), dando destaque também às fontes móveis. A Lei ainda estabelece normas, critérios e padrões voltados ao controle e à manutenção da qualidade do ambiente (BRASIL, 1981).

2.2.1 Controle da emissão de poluentes atmosféricos por fontes móveis

O estabelecimento de critérios para a redução das emissões por fontes móveis, ou veículos automotores, teve início em 1986. No dia 6 de maio daquele ano, através da Resolução N. 18, o CONAMA instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, com os objetivos que seguem (PEREIRA JÚNIOR, 2007):

- Reduzir os níveis de poluentes emitidos por fontes veiculares, visando o atendimento aos padrões de qualidade do ar;
- Promover o desenvolvimento tecnológico;
- Criar programas de inspeção e manutenção de veículos automotores em uso;
- Promover a conscientização da população em relação à poluição do ar por veículos automotores;
- Estabelecer critérios de avaliação dos resultados alcançados;
- Promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis, com vistas à redução da emissão de poluentes.

Apenas em 2002 as emissões das motocicletas começaram a ser controladas, através do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares – PROMOT instituído pela Resolução N. 297/2002 do CONAMA, complementando a PROCONVE (BRASIL, 2002).

Com o passar do tempo, as restrições e exigências acerca das emissões veiculares tornaram-se maiores, e as metas mais ambiciosas. Isto reflete em atualizações do PROCONVE e PROMOT através de Resoluções do CONAMA. Hoje os poluentes restringidos pela Legislação são: Monóxido de Carbono, Hidrocarbonetos totais, Hidrocarbonetos não metânicos, Óxidos de Nitrogênio, Aldeídos e Material Particulado. Para cada categoria de veículo, as restrições aplicam-se aos fatores de emissão, essenciais para a elaboração dos inventários.

2.2.2 Padrões de qualidade do ar

Além de restringir emissões de poluentes por fontes fixas e móveis, devido a crescente preocupação em reestabelecer condições saudáveis de vida à população, os países começaram a desenvolver padrões de qualidade do ar. Segundo a Organização Mundial da Saúde (2000), os padrões de qualidade do ar são metas e limites determinados por cada país, a fim de proteger a saúde pública. Figuram, desta forma, como componentes importantes do planejamento e gestão de políticas ambientais (WHO, 2000).

Ao estabelecer valores limites de concentração de poluentes, questões importantes devem ser consideradas pelos legisladores. Primeiramente, a escolha dos poluentes a serem regulamentados deve passar por extensa revisão de estudos de toxicologia e epidemiologia. Além disso, a definição do valor de referência precisa considerar qual parcela será protegida – a população em geral, ou inclusive grupos sensíveis. O nível de risco considerado aceitável também deve ser discutido, uma vez que ainda não se conhecem todos os efeitos adversos que os poluentes podem causar, e admite-se que a percepção do risco tem variantes sociais, culturais e circunstanciais da localidade (WHO, 2005).

A dificuldade em atender padrões depende dos níveis atuais e diversidade de fontes de poluição, das opções disponíveis para a redução da concentração de poluentes, da disseminação de informações sobre como a redução da poluição beneficiará a população e do ambiente político para a implementação das medidas de controle da qualidade do

ar. Por este motivo, informações provenientes de inventário de emissões e o uso de modelos de dispersão de poluentes são essenciais para gerenciar as medidas de controle da qualidade do ar, onde aplicá-las e em qual escala.

2.2.3 Padrões de qualidade do ar no Brasil

O Ministério do Meio Ambiente (MMA), através da Resolução CONAMA N. 003/1990, definiu os padrões de qualidade do ar classificando-os em padrões primários e secundários, conforme segue (BRASIL, 1990):

a) São padrões primários de qualidade do ar: as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população; e b) São padrões secundários de qualidade do ar: as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e flora, aos materiais e meio ambiente em geral.

Desta forma, os padrões primários de qualidade do ar constituem níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes, ou seja, metas de curto a médio prazo. Já os padrões secundários, podem ser interpretados como níveis desejáveis, ou metas de longo prazo. Assim, esta Resolução quantificou os padrões nacionais de qualidade do ar para as partículas totais em suspensão, partículas inaláveis, fumaça, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio. As concentrações dos padrões estão indicadas conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Padrões nacionais primários e secundários de qualidade do ar.

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário (µg/m³)	Padrão secundário (µg/m³)
Partículas totais em suspensão	24 horas ¹	240	150
	MGA ²	80	60
Partículas inaláveis	24 horas	150	150
	MAA ³	50	50
Fumaça	24 horas	150	100
	MAA ³	60	40
Dióxido de enxofre	24 horas	365	100
	MAA ³	80	40
Dióxido de nitrogênio	1 hora ¹	320	190
	MAA ³	100	100
Monóxido de carbono	1 hora ¹	40.000	40.000
		35 ppm	35 ppm
	8 horas ¹	10.000	10.000
Ozônio		9 ppm	9 ppm
	1 hora ¹	160	160

Fonte: CETESB (2015), com base na Resolução CONAMA Nº 03/1990. Onde: 1 - não deve ser excedido mais de uma vez ao ano, 2 - média geométrica anual e 3 - média aritmética anual.

Conforme prevê a Resolução CONAMA Nº 03/1990, a aplicação dos parâmetros secundários necessitam de prévia classificação do território nacional em classes I, II e III, conforme necessidades de uso. No entanto, enquanto não for estabelecida a divisão, os padrões aplicáveis são os primários (CETESB, 2015).

A legislação ainda define o termo Episódio Crítico de Poluição do Ar, como “a presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período de tempo, resultante da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos” (BRASIL, 1990). Desta forma, os Municípios e os governos dos Estados devem elaborar um Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar, a fim de prevenir danos à saúde da população. Por este motivo, a mesma resolução quantifica (Tabela 2) os níveis de Atenção e Alerta para a execução do Plano, com o objetivo de evitar que o nível de Emergência seja atingido.

Tabela 2: Níveis de poluentes atmosféricos que compõem um Episódio Crítico de Poluição do Ar.

Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas totais em suspensão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	375	625	875
Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	250	420	500
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	250	420	500
Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	800	1.600	2.100
SO ₂ x PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	65.000	261.000	393.000
Dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1h	1.130	2.260	3.000
Monóxido de carbono (ppm) – 8 h	15	30	40
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1 h	400	800	1.000

Fonte: tabela elaborada pela CETESB em 2015, de acordo com a Resolução CONAMA N. 03/1990.

2.2.4 Padrões de qualidade do ar internacionais

A OMS, com o objetivo de oferecer um direcionamento a legisladores em reduzir os efeitos da poluição ambiente na saúde da população, estabeleceu as Diretrizes para a Qualidade do Ar. Em sua edição de 2005, apresentou os seguintes valores de referência (Tabela 3):

Tabela 3: Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde.

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão de qualidade ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP ₁₀	24 horas	50 ¹
	MAA	20
MP _{2,5}	24 horas	25 ¹
	MAA	10
Dióxido de enxofre	24 horas	20
	10 min	500
Dióxido de nitrogênio	1 hora	200
	MAA	40
Ozônio	8 horas	100

Fonte: adaptado de WHO, 2005. Onde: 1 – não pode ser excedido mais de três vezes ao ano e MAA – média aritmética anual.

A Comissão Europeia também tem se esforçado para estabelecer valores limite em relação a diversos poluentes. Na Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa, encontram-se estabelecidos estes padrões. Em comum aos poluentes restringidos pela Resolução CONAMA N° 03/1990, a Tabela 4 apresenta os seguintes valores:

Tabela 4: Valores limite estabelecidos pela Comissão Europeia.

Poluente	Tempo de amostragem	Valor limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP₁₀	24 horas	50 ¹
	MAA	40
MP_{2,5}	24 horas	25
	MAA	125 ²
Dióxido de enxofre	1 hora	350 ³
	MAA	200 ⁴
Dióxido de nitrogênio	1 hora	40
	MAA	120 ⁵
Ozônio	8 horas	10.000
Monóxido de carbono	8 horas	

Fonte: adaptado de EC, 2008. Onde: 1 – não pode ser excedido mais do que 35 vezes ao ano, 2 – não pode ser excedido mais de três vezes ao ano, 3 – não pode ser excedido mais de 24 vezes ao ano, 4 – não pode ser excedido mais de 18 vezes ao ano, 5 – média de 25 dias ao longo de 3 anos e MAA – média aritmética anual.

Em relação aos EUA, a legislação que concerne a melhoria da qualidade do ar e visibilidade apresentou grandes avanços desde o estabelecimento de novas emendas ao *Clean Air Act* no ano de 1990. A Tabela 5 apresenta os poluentes e seus respectivos valores de referência, em comum aos poluentes restringidos pela Resolução CONAMA N° 03/1990:

Tabela 5: Padrões de qualidade do ar estabelecidos pela US EPA.

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário (µg/m³)	Padrão secundário (µg/m³)
MP₁₀	24 horas	150 ¹	Igual ao primário
MP_{2,5}	24 horas	35 ¹	Igual ao primário
	MAA	12 ¹	15 ¹
Dióxido de enxofre	1 hora	197 ²	-
	3 horas	-	1.310 ³
Dióxido de nitrogênio	1 hora	188 ⁴	-
	MAA	100	Igual ao primário
Ozônio	8 horas	140 ⁵	Igual ao primário
Monóxido de carbono	1 hora	40.000 ³	-
	8 horas	10.000 ³	-

Fonte: US EPA, 2016. Onde: 1 – não exceder mais de uma vez ao ano, ao longo de três anos; 2 – em 99% das máximas concentrações horárias, ao longo de 3 anos; 3 – não exceder mais de uma vez ao ano; 4 – em 98% das máximas concentrações horárias, ao longo de 3 anos; 5 – A quarta maior concentração do dia, calculada em médias a cada 8 horas não pode exceder ao limite em 3 anos.; MAA – média aritmética anual.

Ao observar os padrões de qualidade do ar internacionais, nota-se que no geral são mais restritivos do que no Brasil.

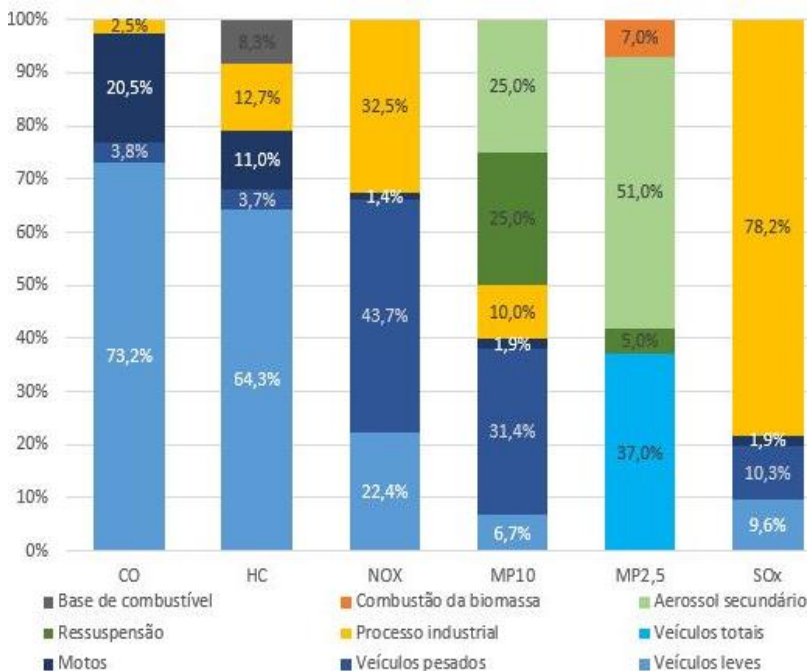
2.2.5 Relação entre emissões veiculares, qualidade do ar e efeitos epidemiológicos

Os efeitos adversos à saúde humana são preocupações atuais dos órgãos reguladores em todo o mundo. Na Europa, segundo a Organização Mundial da Saúde (2004), a questão não apenas inclui doenças respiratórias e cardíacas, como também abrange a diminuição da expectativa de vida da população europeia em um ano. Por este motivo, os esforços em mitigar os casos de doenças devido aos poluentes têm foco no controle das emissões a partir de regulações e legislações, uma vez que outras opções têm se tornado custosas (WHO, 2004).

Para a aplicação de medidas de prevenção e/ou mitigação destes efeitos epidemiológicos, é imprescindível que se conheçam os efeitos que cada poluente causa, e a contribuição de cada tipo de fonte de poluição. Desta forma, é possível agir sobre as fontes que representam maior

contribuição e assim reduzir os efeitos da poluição de forma significativa. No caso das emissões veiculares, em grandes cidades urbanizadas a sua contribuição para o total dos poluentes é significativo, conforme pode-se verificar pela Figura 1 obtida do Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo, elaborado pela CETESB em 2015:

Figura 1: emissões relativas por tipo de fonte na Região Metropolitana de São Paulo.



Fonte: adaptado de CETESB, 2015.

Na Região Metropolitana de São Paulo, das emissões atmosféricas totais em 2014, os veículos foram responsáveis pela emissão de 97,5% de CO, 79% de HC, 67,5% de NO_x, 21,8% de SO_x e 40% de MP₁₀ e 37% de MP_{2,5}. Destes, o poluente que mais recebe contribuição de veículos leves e motocicletas é o CO, enquanto NO_x é o que mais recebe contribuição de veículos pesados. Hidrocarbonetos também representam grande contribuição de veículos leves, no entanto as legislações brasileiras e internacionais não definem valores limites para a concentração deste poluente no ar ambiente. Quanto ao monóxido de carbono e a forma

dióxido de nitrogênio, ambos são considerados nos padrões de qualidade do ar, e portanto são objeto de estudo do presente trabalho.

A relação entre a qualidade do ar ambiente, e os efeitos epidemiológicos decorrentes de sua concentração em determinado espaço de tempo encontram-se no **Anexo A**, em que considera-se como grupos sensíveis as crianças, os idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas. Para o CO e o NO₂, especificamente, a Tabela 6 apresenta esta relação:

Tabela 6: Relação entre a qualidade do ar e os efeitos epidemiológicos correspondentes, para os poluentes CO e NO₂.

Qualidade	CO (ppm) 8h	NO₂ (µg/m³) 1h	Significado
Boa	0 – 9	0 – 200	
Moderada	> 9 – 11	> 200 – 240	Tosse seca e cansaço em pessoas de grupos sensíveis. O restante da população não é afetado.
Ruim	> 11 – 13	> 240 – 320	Tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e gargante em toda a população. Grupos sensíveis podem experimentar efeitos mais sérios.
Muito ruim	> 13 – 15	> 320 – 1130	Agravamento das condições do grupo acima, além de falta de ar e respiração ofegante em toda a população. Grupos sensíveis com efeitos ainda piores.
Péssima	> 15	> 1130	Sérios riscos de manifestação de doenças cardiovasculares e respiratórias. Efeitos ainda piores em grupos sensíveis.

Fonte: CETESB, 2015.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES

A concentração de poluentes emitida por fonte não é a mesma que chega aos receptores. Isto deve-se ao fato de que as emissões são dispersadas e transformadas na atmosfera ao longo do seu percurso. Assim, a localização dos receptores relativa à dos emissores influencia a concentração de poluentes recebida em um ponto do espaço; e a

sensibilidade dos receptores, por sua vez, determina os efeitos da poluição (VALLERO, 2008). Para avaliar a concentração de poluentes dispersos na atmosfera, uma série de ferramentas estão disponíveis. Estas geralmente associam a medição em campo, ou estimativa dos poluentes que são emitidos pelas fontes, com a simulação matemática da dispersão destes poluentes no ar ambiente.

Os modelos matemáticos de dispersão de poluentes são, basicamente, um conjunto de funções programadas com o auxílio de um computador, com o propósito de estimar as concentrações causadas por uma fonte emissora, em um determinado ponto receptor (NOVA ZELÂNDIA, 2004). Eles fornecem, portanto, uma descrição matemática do transporte do poluente na atmosfera. Permitem verificar, por exemplo, a contribuição de fontes específicas para a concentração de contaminantes em uma localidade, ou como a qualidade do ar será alterada em decorrência do aumento/redução da emissão de um poluente.

De acordo com Seinfeld e Pandis (2006), existem dois tipos de abordagens ao transporte de poluentes na atmosfera: o método Lagrangeano e o Euleriano. O primeiro simula a dispersão dos poluentes usando um sistema de referência fixado no centro de massa da parcela de ar em questão. Os modelos lagrangeanos são mais realísticos. No entanto, precisam de um campo de vento tridimensional, o que dificulta sua aplicação. E o segundo, descreve as concentrações nos receptores através de um sistema de referência fixo no espaço. Desta forma, as duas perspectivas se diferem de acordo com a mobilidade do sistema de referência (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Matematicamente, os modelos (Lagrangeanos ou Eulerianos) podem ser resolvidos de forma analítica ou numérica, dependendo de como é solucionada a equação diferencial que representa o problema físico. A forma analítica utiliza hipóteses, condições iniciais e de fronteiras para simplificar a equação e assim chegar a uma solução fechada da equação diferencial. Já os modelos numéricos dividem o domínio de interesse em pequenas partes, e as equações são resolvidas em cada uma delas utilizando métodos de solução de sistemas lineares, até atingir um predefinido critério de convergência (MALISKA, 2010).

Comparando a forma numérica e a analítica, a solução analítica obtém resultados com mais rapidez, no entanto muitas simplificações podem distanciar a solução da realidade. Em relação à abordagem numérica, quanto menor for o tamanho das células que compõem o domínio, mais refinado será o resultado do modelo, podendo fornecer uma análise mais próxima do problema físico real. Todavia, métodos numéricos são dispendiosos em termos de ocupação de memória e tempo

de processamento computacional, tornando-os menos atrativos para avaliar a qualidade do ar com fins regulatórios (HOINASKI, 2015).

Percebe-se, desta forma, que modelos mais complexos não têm o objetivo de substituir os que adotam simplificações. Eles podem ser utilizados de forma complementar, ou com finalidades diferentes – dependendo do tempo, da escala de aplicação e dos recursos computacionais disponíveis. No presente estudo um modelo analítico Euleriano foi utilizado para realizar as simulações, portanto os itens que seguem apresentam alguns exemplos de modelos analíticos usualmente aplicados em dispersão de emissões veiculares, após justificou-se o modelo escolhido.

2.3.1 Modelos utilizados para analisar a dispersão de emissões veiculares

Alguns modelos de dispersão atmosférica disponíveis serão brevemente descritos (VALLERO, 2008, US EPA, 2005 e EPA ORD 2013 e ROBINS, 2000):

- ***AERMOD Modeling System***: este é o *software* recomendado pela US EPA (*United States Environmental Protection Agency*) para que os órgãos de fiscalização local e estadual determinem seu progresso quanto a redução de poluentes no ar ambiente. É um modelo estacionário, que incorpora a dispersão atmosférica baseado na turbulência que ocorre na camada limite planetária. Tanto fontes área quanto pontuais podem ser simuladas pelo modelo, bem como terrenos simples e complexos. Dois pré-processadores podem ser incorporados ao *software*: o *AERMET*, que processa dados meteorológicos, e o *AERMAP*, um pré-processador que incorpora o modelo digital de elevação de terrenos complexos;

- ***CALPUFF Modeling System***: é um modelo lagrangeano que representa a pluma através de vários “puffs” discretos, representando o material poluente. Ele simula os efeitos das variações meteorológicas no tempo e no espaço, sobre a dispersão dos poluentes. Ele inclui influências do terreno, e feitos de longo alcance sobre os poluentes, como mecanismos de remoção por deposição e transformação química, quanto efeitos de visibilidade causados por concentrações de material particulado. Por ser muito abrangente em suas funções, o modelo exige um grande número de dados de entrada;

- **CALINE3**: é um modelo de pluma estacionário, desenvolvido para determinar concentrações de poluentes em receptores no sistema viário. De acordo com Benson (1979) ele é indicado para aplicação em estradas, pois trata a região diretamente acima da via como uma “zona de mistura”. Para tanto, ele leva em consideração a turbulência mecânica causada pelo movimento dos automóveis, e a turbulência térmica criada pela combustão. No entanto, o modelo *CALINE3* é limitado aos terrenos considerados simples;

- **CAL3QHC/ CAL3QHCR**: o *CAL3QHC* é um modelo baseado no *CALINE3*, que inclui estimativas de zonas de calor devido a filas no tráfego, bem como leva em consideração os atrasos decorrentes das interseções de vias sinalizadas. Este modelo apresenta uma versão mais refinada, o *CAL3QHCR*, que requer dados meteorológicos locais;

- **RLINE**: é um modelo estacionário sob desenvolvimento da EPA ORD (*Environmental Protection Agency Office of Research and Development*). Tem o objetivo de avaliar o impacto na qualidade do ar nas proximidades de rodovias, simulando as fontes móveis como uma linha. Para tanto o *RLINE* integra numericamente fontes pontuais, mas o modelo oferece também a alternativa de utilizar uma aproximação analítica ao invés da solução numérica. É indicado para terrenos planos, e para avaliar concentrações próximas do solo;

- **ADMS**: *software* desenvolvido pelo CERC (*Cambridge Environmental Research Consultants*) com o propósito de simular o impacto na qualidade do ar de fontes industriais existentes ou em fase de aprovação. O modelo simula emissões de fontes pontuais, em jatos, linha, área e volume. Assim como o *AERMOD*, incorpora um pré-processador meteorológico. Ele costuma ser recomendado no Reino Unido para fins regulatórios.

2.3.2 Por que utilizar o *AERMOD*?

De acordo com U.S. EPA (2004), o sistema *AERMOD* foi criado com o objetivo de substituir o modelo usado até então (*ISC3*), que sofrera poucas atualizações desde a sua criação. A finalidade do novo sistema, no entanto, era a mesma: estimar o impacto de emissões predominantemente industriais nas redondezas, e servir como plataforma regulamentadora da US EPA. Para tanto, o *AERMOD* propunha adotar a mesma estrutura

computacional de entradas e saídas que o *ISC3*; atualizar algoritmos antiquados; e garantir que os processos já modelados no *ISC3* pudessem ser adaptados para o substituto com melhorias.

De acordo com o Apêndice W das Diretrizes sobre Modelos de Qualidade do Ar publicadas em 2005 pela US EPA, o *AERMOD* era recomendado para simular concentrações nos entornos da fonte emissora para fins regulatórios. Para monóxido de carbono e chumbo provenientes de emissões viárias, ambos *CAL3QHC* e *CALINE3* eram preferidos, enquanto para dióxido de nitrogênio, preferia-se o *CAL3QHC*. Nenhum modelo específico era recomendado para material particulado, embora o *CALINE3* o fosse para poluentes emitidos por fontes veiculares, com tempo de média entre 1 e 24h. Quando se tratava de simular a dispersão além de um raio de 50 km, o *CALPUFF* era preferido no lugar do *AERMOD* (US EPA, 2005).

No entanto, em julho de 2015 a agência publicou um documento técnico sugerindo a substituição do *CALINE3* pelo *AERMOD*, como modelo recomendado na análise da dispersão de emissões veiculares no geral, inclusive para analisar material particulado e monóxido de carbono. Estas sugestões foram acatadas, e além disso a revisão do Apêndice W publicada em janeiro de 2017 removeu o *CALPUFF* como recomendado para avaliar concentrações a mais de 50 km da fonte, mantendo o modelo como uma ferramenta de “triagem”, com entradas mais simples, para verificar se há a necessidade de utilizar modelos mais refinados (US EPA, 2017).

O documento técnico emitido pela US EPA sugerindo as mudanças baseava-se principalmente no estudo de Heist *et al.*, 2013, que avaliou a performance de quatro modelos de dispersão (*RLINE*, *AERMOD-volume*, *AERMOD-area*, *ADMS*, *CALINE3* e *CALINE4*) em simular as concentrações de emissões veiculares. Para tanto, as simulações foram comparadas com resultados experimentais de substâncias traço em duas situações: em um campo aberto, e em uma rodovia (HEIST *et al.*, 2013).

O estudo de Heist *et al.* (2013) forneceu métricas estatísticas que indicaram que os modelos *CALINE* tiveram a pior performance quando comparados com os valores experimentais. Mesmo quando avaliadas apenas as concentrações mais altas (o que é do interesse das análises regulatórias), as duas versões do *CALINE* obtiveram os resultados mais distantes da realidade. Inclusive, para as concentrações máximas analisadas, o *AERMOD* teve a melhor performance entre todos – mesmo entre o *ADMS* e *R-LINE* - apontando-o como o mais eficaz para fins regulatórios (HEIST *et al.*, 2013).

Pode-se notar no artigo de Heist *et al* (2013) que dois tipos de fontes do *AERMOD* (área e volumétrica) com aplicações distintas apresentaram resultados próximos ao simular emissões veiculares. Neste sentido, um dos objetivos do presente estudo foi verificar se o mesmo ocorre quando confrontadas fontes área e pontuais. Portanto no item a seguir constam o funcionamento do modelo escolhido, bem como as possíveis configurações que ele pode assumir para adequar-se às suas aplicações.

2.3.3 Como funciona o *AERMOD*?

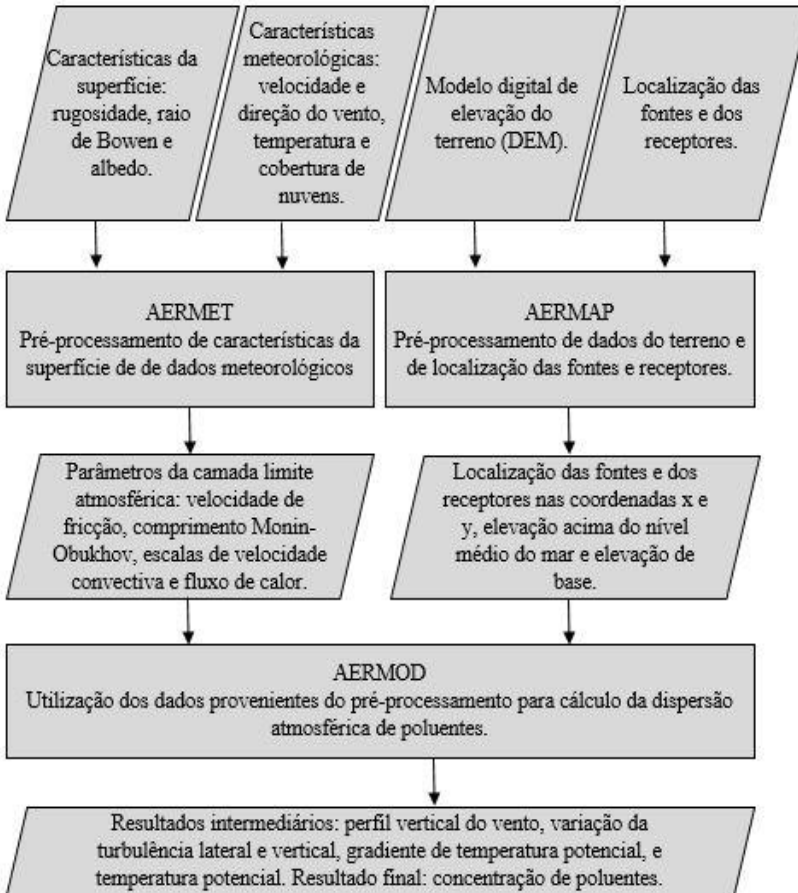
O sistema é composto por dois pré-processadores (*AERMET* e *AERMAP*) e um modelo de dispersão, conforme pode-se visualizar na Figura 2, que contém o fluxograma do sistema. O fluxo de dados da Figura 2 foi elaborado a partir da explicação contida na Descrição de Formulação do Modelo, apresentada resumidamente a seguir (US EPA, 2004a):

As forçantes de entrada do *AERMET* são dados meteorológicos, como a velocidade e direção do vento, temperatura e cobertura de nuvens. Já as condições de contorno são as características da superfície (albedo, razão de Bowen e rugosidade). Estes dados são utilizados para calcular parâmetros da camada limite atmosférica necessários para o *AERMOD*, como velocidade de fricção (u_*), comprimento Monin-Obukhov (L), escala de velocidade convectiva (w_*) escala de temperatura (θ_*), altura de mistura (z_i), e fluxo de calor da superfície (H). Estes parâmetros são passados para o *AERMOD* onde expressões da teoria da similaridade calculam o perfil vertical da velocidade do vento (u), variações turbulentas laterais e verticais (σ_v , σ_w), gradiente potencial de temperatura ($d\theta/dz$) e potencial de temperatura (θ).

Conforme citado anteriormente o *AERMOD* é um modelo de pluma estacionária, e a cada hora assume temporariamente as condições meteorológicas médias daquela hora, modelando as concentrações da mesma forma em todas as distâncias.

Enquanto isso o *AERMAP* utiliza o modelo digital de elevação do terreno como condição de contorno para calcular a altura do terreno (h_c) associada à localização de cada receptor. Este pré-processador ainda é utilizado para criar grades de receptores, fornecidas ao *AERMOD*. Assim o *AERMAP* fornece: localização do receptor (x_r , y_r), sua altura em relação ao nível do mar (z_r) e a escala de altura específica do receptor (h_c).

Figura 2: Fluxo de dados do *AERMOD Modeling System*.



Fonte: elaborado pela autora.

Em geral, no *AERMOD* a pluma responde ao terreno de duas formas combinadas: a pluma horizontal, que é afetada pelo terreno; e a vertical que segue conforme o terreno. A concentração é calculada, então, em função dos dois estados da pluma. Nos terrenos planos, os dois estados são equivalentes. A fórmula geral da concentração que representa esta combinação apresenta-se na Fórmula 3:

$$C_T \{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s} \{x_r, y_r, z_r\} + (1 - f) C_{c,s} \{x_r, y_r, z_p\} \quad (3)$$

onde $C_T \{x_r, y_r, z_r\}$ é a concentração total; $C_{c,s} \{x_r, y_r, z_r\}$ é a contribuição da pluma horizontal, em condições estáveis e convectivas (indicadas pelos índices c e s); $C_{c,s} \{x_r, y_r, z_p\}$ é a contribuição da pluma vertical; $\{x_r, y_r, z_r\}$ são as coordenadas do receptor; f é o fator de ponderação entre os dois estados da pluma; z_p é a soma da altura relativa do receptor, com a altura do terreno (para terrenos planos $z_p = z_r$, deixando apenas a contribuição da pluma horizontal). Descrições detalhadas podem ser encontradas na descrição da formulação do modelo, presente no documento “*AERMOD: Description of model formulation*” (USEPA, 2004).

Em relação às configurações que o modelo pode assumir, de acordo com o Manual do Usuário do *AERMOD*, ele pode simular múltiplas fontes, sendo elas pontuais, volumétricas ou área (US EPA, 2004b):

- **Fontes pontuais:** usualmente empregam-se fontes pontuais para simular emissões típicas de chaminés e exaustores isolados.
- **Fontes volumétricas:** utilizadas quando há uma grande variedade de fontes industriais (múltiplas chaminés, exaustores, e saídas de ar do telhado);
- **Fontes área:** entre as três configurações, é a única que não inclui o efeito de elevação da pluma, e portanto deve ser utilizada para emissões a nível próximo do solo, como o caso da emissão veicular.
- **Fontes em linha:** também é possível reproduzir fontes do tipo linha, representando-a como uma área alongada ou como uma série de fontes volumétricas igualmente espaçadas, ao longo de uma linha.

Conforme citado no item anterior, os dois tipos de fontes utilizados neste estudo são as área e as pontuais. É preciso destacar que as concentrações são calculadas de duas formas diferentes em cada uma delas. Na configuração pontual utiliza-se a emissão de cada ponto emissor, em cada hora, para calcular as concentrações horárias em cada ponto receptor. As concentrações horárias calculadas para cada fonte e cada receptor são somadas para obter o total produzido em cada receptor (US EPA, 2004a).

Já as fontes área utilizam uma taxa de emissão uniforme ao longo da forma geométrica. É possível reproduzir diversos polígonos de até 20 vértices, com taxas de emissão diferentes entre si, no entanto dentro de cada área a taxa de emissão é uniforme. A emissão de área utiliza uma integração numérica da área nas direções a favor e contra o vento para resultar nas concentrações que chegam nos receptores (US EPA, 2004a).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo se localiza na Avenida Beira Mar Norte, no município de Florianópolis. Com 438,5 km², o município situa-se no estado de Santa Catarina, integrante da Região Sul do Brasil. O território é dividido em uma porção insular que abrange 426,6 km², e em uma parte continental, com área de 11,9 km² (FLORIANÓPOLIS, 2011). Especificamente, a Avenida está localizada na porção insular de Florianópolis, compõe-se pela Avenida Governador Irineu Bornhausen, e a Avenida Jornalista Rubens de Arruda Ramos, e configura uma das principais rotas de acesso da população que transita entre o Continente e a Ilha.

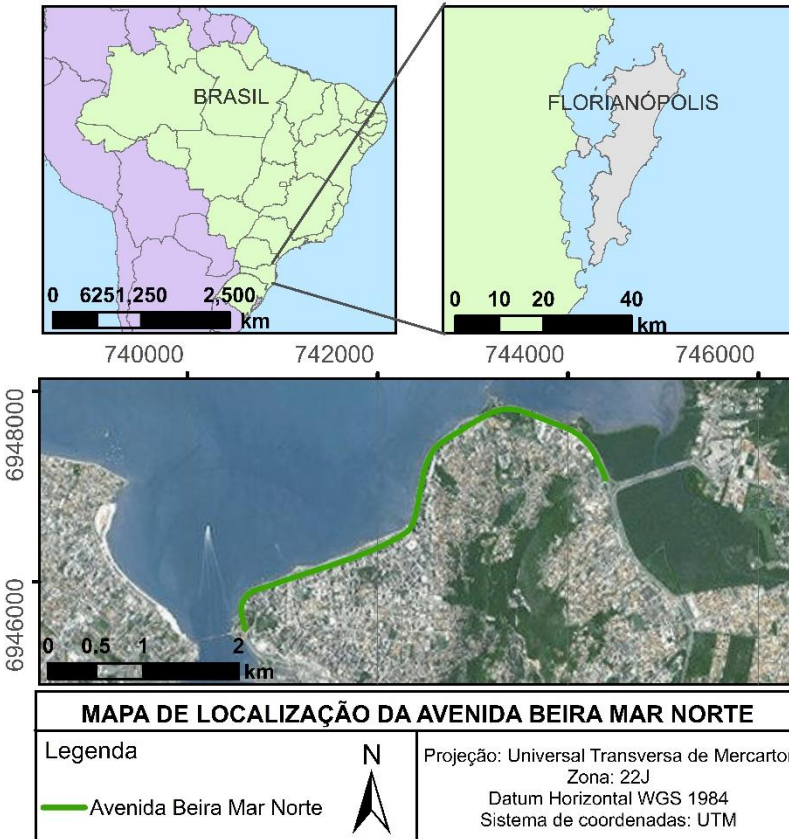
Florianópolis é um pólo turístico consolidado, com expansão urbana cada vez mais desvinculada da região central, indo em direção aos balneários e formando subcentros urbanos. Com a população de 421.240 habitantes e área total de 675,409 km² (incluindo as Baías Sul e Norte), a cidade possui uma densidade demográfica de 623,68 hab/km². A cidade caracteriza-se por possuir população predominantemente urbana, correspondendo a 96% da população (IBGE, 2010).

A Avenida Beira Mar Norte é descrita como um refúgio para os moradores da cidade, que se deslocam dos bairros adjacentes em busca de um espaço social privilegiado em infra-estrutura, onde se concentram pistas de caminhada e corrida e áreas de recreação (VIEIRA, 2013). Percebe-se, desta forma, que além de ser um elemento importante da mobilidade urbana de Florianópolis, a Avenida ainda proporciona um ambiente de esporte, descanso e lazer para a população. Evidenciando a importância da preservação da qualidade do ar ambiente.

A via localiza-se nos bairros Centro e Agrônômica, e os seus entornos ainda incluem Trindade, Itacorubi e João Paulo na Ilha; e na porção continental, Estreito, Capoeiras e Coqueiros. Desta forma, foram analisadas as concentrações que chegam nos bairros onde se localizaram as fontes, quanto aqueles em seus entornos. O Anexo B contém o mapa da divisão dos bairros.

Aplicou-se a metodologia de modo a abranger 5,91 km de extensão da Av. Beira Mar Norte, a mesma está delimitada na cor verde do mapa da Figura 3:

Figura 3: mapa de localização da Avenida Beira Mar Norte.



Fonte: elaborado pela autora, com bases cartográficas disponibilizadas pelo IBGE (2015).

3.2 DADOS DE ENTRADA DO AERMOD

Os dados de entrada necessários ao modelo *AERMOD* dividem-se em dados referentes aos pré-processamentos meteorológico e topográfico, e ao processamento das emissões veiculares. As sessões a seguir explicam a fonte e a forma de obtenção de cada um deles.

3.2.1 Emissões de CO e NO₂

Os dados referentes às emissões de poluentes pelos veículos provêm da estimativa de emissões veiculares realizada por Melissa Cavichioli Fernandes (2014), na mesma localidade (Anexo B). Estas estimativas correspondem a período de contagem veicular realizado entre 14 de dezembro de 2014 e 20 de dezembro de 2014. A Tabela 7 resume os valores, em g/s, adotados para os poluentes CO e NO_x:

Tabela 7: Taxa total de emissão de poluentes provenientes dos veículos que transitaram na Av. Beira Mar-Norte, entre 14/12/2010 e 20/12/2010.

Poluente	Emissão (g/s)
Monóxido de carbono (CO)	28,67
Óxidos de nitrogênio (NO_x)	5,45

Fonte: baseado em Fernandes (2014).

Insta salientar que Fernandes utilizou a metodologia *Bottom-up*, descrita pela Equação 2, para a estimativa das emissões. Desta forma, o método utilizado por Fernandes partiu da contagem de veículos leves e pesados que transitaram na Avenida naquele período; dos fatores de emissão dependentes do ano-modelo, tipo de veículo e tipo de combustível; e da distância do trecho considerado. Para cada tipo de veículo (automóveis, comerciais leves, motocicletas, caminhões e ônibus) e cada ano (de 0 a 20 anos, e maior do que 20 anos), a autora obteve uma taxa de emissão. Portanto, para a tabela acima, procedeu-se a soma dos tipos e da idade dos veículos, para obter o total emitido para cada poluente, em condição de fluxo médio de veículos (FERNANDES, 2014). Para as condições de fluxo mínimas e máximas estudadas pela autora, as emissões podem ser menores ou maiores, respectivamente.

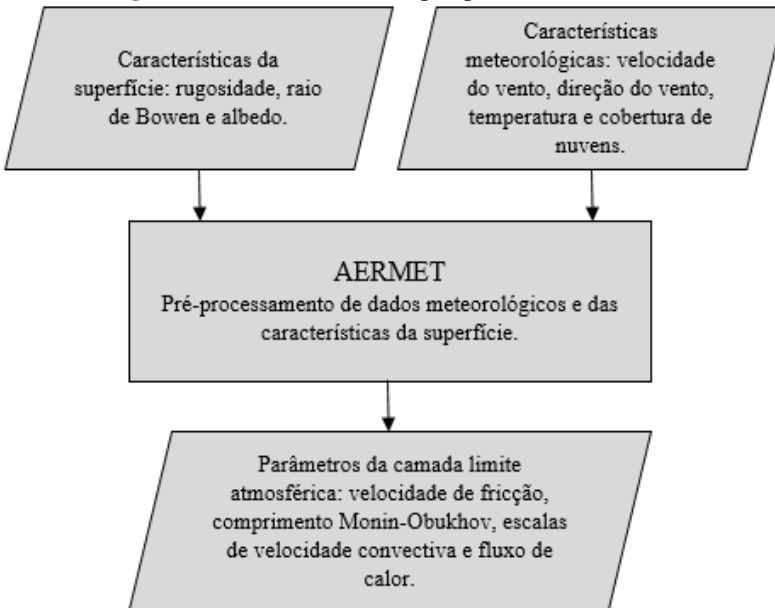
Outra observação importante é que o presente trabalho adotará uma abordagem conservadora no que tange a relação NO₂/NO_x. Ainda que apenas uma parte do NO_x seja convertida na forma NO₂, como não foi encontrado um estudo que tenha definido esta relação para a localidade considerada, toda a taxa de emissão da Tabela 7 será considerada como emissão de NO₂. Esta é uma das abordagens recomendadas pela US EPA em 2014, no documento “Nota de esclarecimento sobre o uso do modelo de dispersão *AERMOD* para demonstrar concordância com os padrões de qualidade do ar nacionais de NO₂”. Isto também vai de encontro ao que foi discutido no capítulo de revisão bibliográfica, onde diante de uma incerteza de dados, adota-se o princípio da precaução. A partir daqui, as taxas de emissão, os resultados e a discussão sobre a dispersão do NO_x serão tratados como NO₂.

3.2.2 Pré-processamento de dados meteorológicos

Para conduzir o pré-processamento no *AERMET*, necessitou-se fornecer: a) dados meteorológicos observacionais; b) dados de ar superior obtidos por sondagem, e c) características estimadas da superfície de estudo. Com estes dados, o modelo gerou dois arquivos ASCII: .sfc e .pfl, que correspondem respectivamente aos parâmetros da camada limite atmosférica; e ao perfil de ventos, temperatura e desvio padrão da velocidade das componentes do vento.

O fluxograma de dados apresenta-se na Figura 4. Em seguida, apresenta-se a fonte de cada um dos dados necessários.

Figura 4: Fluxo de dados no pré-processador *AERMET*.



Fonte: elaborado pela autora.

a) Dados meteorológicos:

Obteve-se do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) dados observacionais que correspondem às informações de entrada do pré-processador meteorológico *AERMET*. O período de dados computados foi de 01/01/2015 a 31/12/2015, da estação meteorológica SBFL.

As entradas foram recebidas no formato .txt (arquivo de texto), e procedeu-se conversão para o formato SAMSOM com o auxílio do *software MATLAB*.

As condições meteorológicas médias de temperatura, pressão, umidade relativa do ar e ponto de orvalho encontram-se na Tabela 8. A síntese dos dados meteorológicos do período considerado encontram-se no Anexo C.

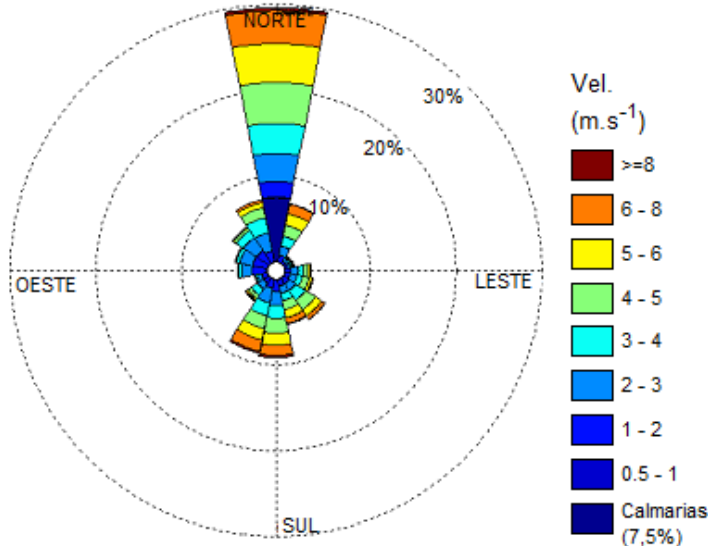
Tabela 8: condições meteorológicas médias durante o ano de 2015.

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura	21,92	°C
Ponto de orvalho	17,96	°C
Umidade relativa do ar	79,30	%
Pressão reduzida ao nível médio do mar	1015,37	mbar

Fonte: elaborado pela autora, com dados observacionais de CPTEC, 2016.

A rosa dos ventos referente ao período de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2015 – ano em que os dados da contagem veicular foram extrapolados – apresenta-se na Figura 5. Conforme a figura, pode-se notar a predominância de ventos vindos da direção Norte (N), com velocidade de até 8 m/s.

Figura 5: Rosa dos ventos referente aos dados meteorológicos do período entre 01/01/2015 e 31/12/2015.



Fonte: elaborado pela autora, com dados observacionais de CPTEC, 2016.

b) Dados de ar superior:

Obteve-se dados de sondagens através da página do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). As informações também correspondem ao período de 01/01/2015 a 31/12/2015, geradas pela Estação de Superfície do Destacamento de Controle Aéreo (DTECEA), situada no Aeroporto Internacional Hercílio Luz na cidade de Florianópolis/SC (83899/SBFL).

O formato solicitado das entradas foi o FSC, o mesmo reconhecido pelo modelo, não necessitando conversão.

c) Características estimadas da superfície de estudo:

Segundo o manual do usuário do *AERMET*, a determinação do albedo, da razão de Bowen e rugosidade dependem dos usos do solo, e variam de acordo com a estação do ano. Como as condições de temperatura e maturidade da vegetação variam entre as regiões mesmo que se trate da mesma estação do ano, o manual do modelo descreveu o

que deve-se considerar como a primavera, o verão, outono e inverno, conforme o segue:

- Primavera : superfície em que a vegetação encontra-se parcialmente verde;
- Verão : superfície com a vegetação exuberante ou plena ;
- Outono : superfície parcialmente exposta devida à época de colheitas e à queda de folhagens das árvores, e que apresenta temperaturas normalmente baixas ;
- Inverno : superfície coberta por neve e temperaturas abaixo de zero.

Neste sentido, o presente trabalho considera que o conceito de Primavera é o que melhor aplica-se à região durante todo o ano de 2015. Para esta estação, os parâmetros da superfície assumem os valores da Tabela 9:

Tabela 9: Parâmetros de superfície conforme o uso, correspondentes à estação da Primavera.

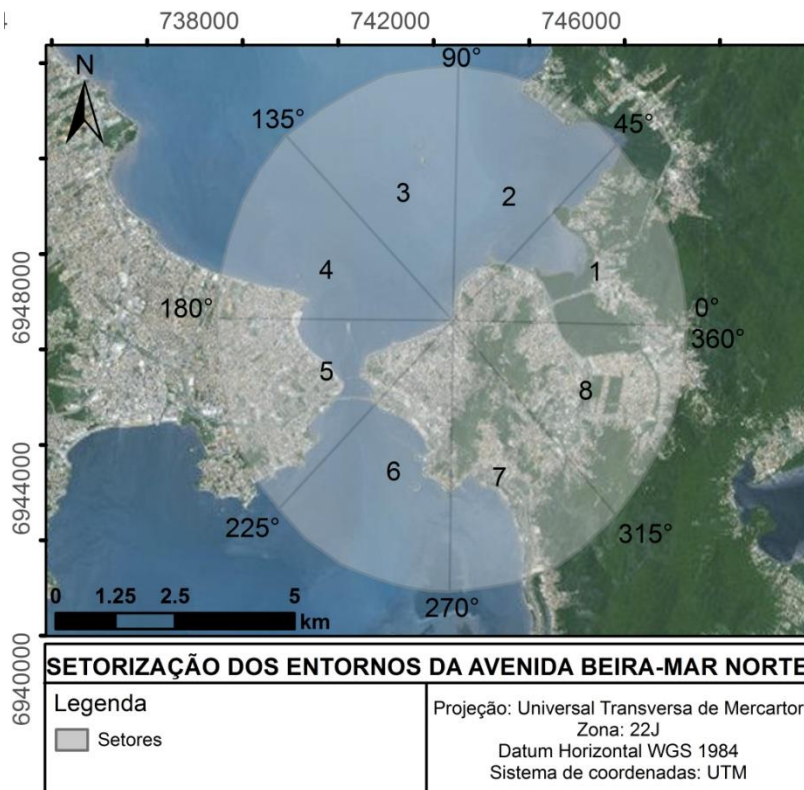
Superfície	Albedo	Bowen	Rugosidade
Água (doce ou salgada)	0,12	0,1	0,0001
Floresta	0,12	0,7	1
Urbano	0,14	0,1	1

Fonte: U.S. EPA (2015) adaptado pela autora.

No entanto, a superfície de estudo possui usos heterogêneos, portanto deve-se efetuar uma média ponderada dos usos de acordo com a porcentagem de área ocupada por cada um deles. Para determinar a porcentagem de ocupação dos usos, a área de estudo foi dividida em setores equidistantes entre si. A Figura 6 na página seguinte apresenta a divisão em 8 partes iguais.

Para a setorização utilizou-se uma imagem de alta resolução presente na base de dados do *software Arcgis*, aproximou-se a área de estudo e delimitou-se um círculo de raio igual a 5 km. Deste círculo obteve-se a parcela de ocupação de cada uso da superfície conforme a Tabela 10.

Figura 6: Mapa de setorização dos entornos da Avenida Beira-Mar Norte, em Florianópolis/SC, utilizado para a definição dos usos da superfície.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 10: Parcela de ocupação para cada uso da superfície, em cada setor.

Sector	Entre:	Água	Urbano	Floresta
1	0 – 45°	0,15	0,47	0,38
2	45 – 90°	0,85	0,14	0,01
3	90 – 135°	0,97	0,03	0,00
4	135 – 180°	0,84	0,15	0,00
5	180 – 225°	0,37	0,60	0,03
6	225 – 270°	0,82	0,17	0,01
7	270 – 315°	0,29	0,41	0,30
8	315 – 360°	0,00	0,56	0,44

Fonte: elaborado pela autora.

Efetuada uma média ponderada, obteve-se os parâmetros albedo, razão de Bowen e rugosidade, para cada setor da Tabela 11:

Tabela 11: Valores de albedo, razão de Bowen e Rugosidade para cada setor da área de estudo.

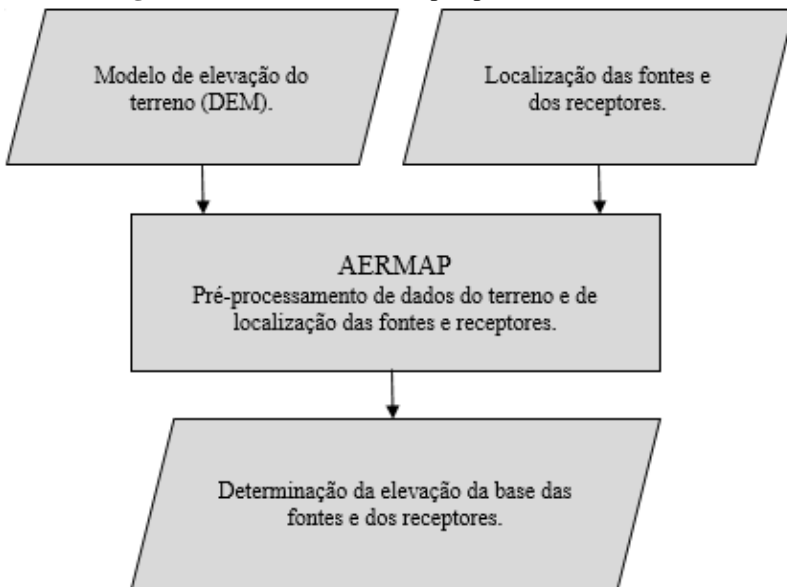
Setor	Entre:	Albedo	Bowen	Rugosidade
1	0 – 45°	0,1293	0,3289	0,8473
2	45 – 90°	0,1229	0,1060	0,1540
3	90 – 135°	0,1206	0,1006	0,0296
4	135 – 180°	0,1231	0,1019	0,1581
5	180° – 225°	0,1321	0,1156	0,6288
6	225 – 270°	0,1234	0,1052	0,1802
7	270 – 315°	0,1281	0,2811	0,7077
8	315 – 360°	0,1313	0,3612	1,0000

Fonte: elaborado pela autora.

3.2.3 Pré-processamento de dados do terreno

O pré-processador *AERMAP* foi utilizado para incorporar as particularidades do terreno na dispersão dos poluentes, bem como para gerar uma grade de receptores e suas elevações de base. A saída do *AERMAP* pode ser lida em documento de texto e já se encontra no formato necessário para ser inserido no *AERMAP*. O fluxo dos dados do pré-processador apresenta-se na Figura 7.

Figura 7: Fluxo de dados no pré-processador *AERMAP*.



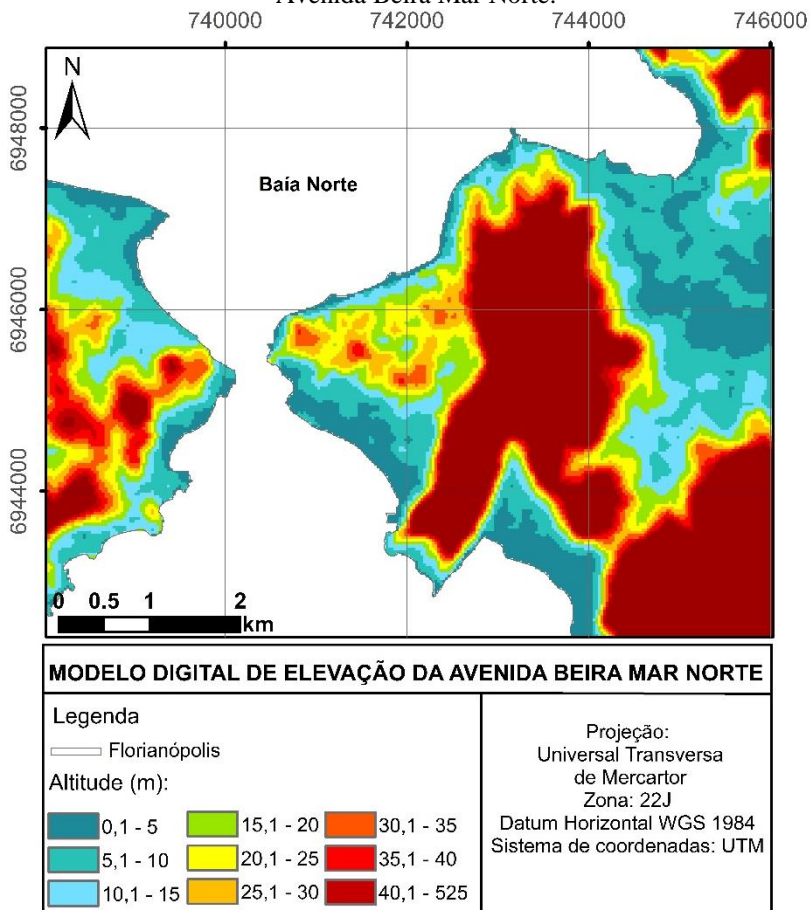
Fonte: elaborado pela autora.

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 7, para efetuar o pré-processamento necessitou-se das seguintes entradas: a) o modelo digital de elevação, e b) a localização dos receptores, que foram obtidas conforme segue.

a) Modelo digital de elevação (MDE):

Obteve-se o modelo de elevação através da página de Mapas Digitais de Santa Catarina da EPAGRI/CIRAM, referente à Região 8 (Sul Catarinense), no formato .TIFF. Procedeu-se conversão para o formato matricial (raster) para a utilização no *AERMAP*. Na Figura 8 apresenta-se o mapa de localização de Florianópolis, com o seu respectivo modelo digital de elevação.

Figura 8: Modelo digital de elevação de Florianópolis, nos entornos da Avenida Beira Mar Norte.



Fonte: Bases cartográficas disponibilizadas pelo IBGE (2015) e Modelo Digital de Elevação por SRTM/NASA – SC, ajustado pela EPAGRI (2015).

b) Localização dos receptores:

Quanto à localização de cada receptor, ela foi adotada durante o pré-processamento no *AERMAP* através da configuração de uma rede de receptores com espaçamentos e altura em relação à base pré-definidos.

Para a grade de receptores, 200 pontos foram espaçados em 250 metros horizontalmente e na direção vertical, com o eixo de coordenadas

UTM iniciando em 717237.56 E e 6921442.1 N, Zona 22J, totalizando 40.000 receptores.

3.3 CENÁRIOS E EVENTOS TESTADOS

Para escolher os cenários testados levou-se em consideração as possíveis configurações das fontes; e para os eventos, a excedência dos padrões de qualidade do ar estabelecidos em norma. A escolha dos cenários baseou-se no sugerido pelo Manual do Usuário do *AERMOD*, bem como em um estudo comparativo feito por Heist *et al.* 2013, já discutido no capítulo da revisão bibliográfica.

3.3.1 Fontes pontuais

Para elaborar o cenário de fontes pontuais, utilizou-se o *software Arcgis* como ferramenta. Nele foi possível distribuir as fontes ao longo da Avenida, obter a localização exata de cada uma em coordenadas UTM e inserir as informações necessárias ao modelo.

Para tanto distribuiu-se pontos ao longo da Avenida, de 50 em 50 metros, totalizando 109 fontes. Extraíram-se então as coordenadas UTM de cada ponto, bem como a elevação de cada um. A Figura 9 apresenta as fontes distribuídas no mapa.

Além da identificação das fontes, o modelo ainda necessita da taxa de emissão de cada uma. Como as taxas apresentadas no item 3.2.1 eram totais para cada poluente, foi preciso dividir a emissão total pelo número de fontes, como exposto na Tabela 12.

Tabela 12: Taxa de emissão de CO e NO₂ dividida entre cada uma das fontes localizadas na Avenida Beira Mar Norte.

Poluente	Emissão total (g/s)	Emissão por fonte (g/s)
Monóxido de carbono (CO)	28,67	0,2630
Dióxido de nitrogênio (NO₂)	5,45	0,0500

Fonte: elaborado pela autora.

A altura da emissão foi estabelecida em 1,0 m, e a velocidade em 0,1 m/s, com o objetivo de simular uma emissão horizontal.

Estes dados foram então inseridos na rotina do *AERMOD*, e as saídas utilizadas para compor os mapas de isoconcentrações e de frequência de ocorrência de eventos.

Figura 9: Distribuição das 109 fontes pontuais ao longo da Avenida Beira Mar Norte.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

3.3.2 Fontes área

Assim como para as fontes pontuais, utilizou-se o *Arcgis* no traçado das áreas de emissão. Desta forma, ao longo das três vias da Avenida, traçaram-se 30 polígonos, totalizando uma área igual a 147.657,43 m². Neste caso a taxa de emissão foi dividida pela soma das áreas dos polígonos. Assim, obteve-se a Tabela 13:

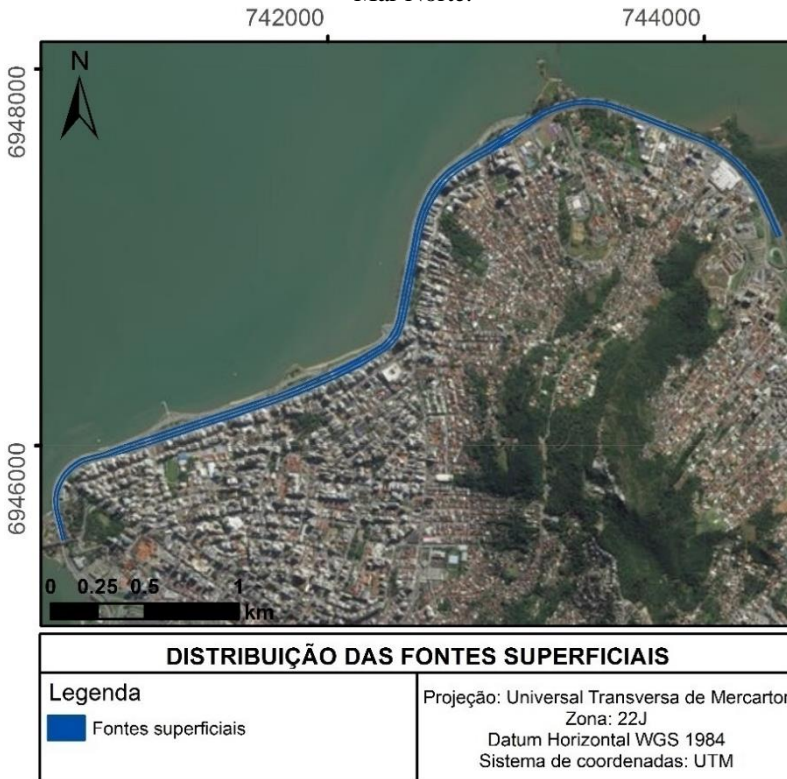
Tabela 13: Taxa de emissão de CO e NO₂ dividida pela área total dos polígonos traçados sobre as três vias da Avenida Beira Mar Norte.

Poluente	Emissão total (g/s)	Emissão por fonte (g/s.m ²)
Monóxido de carbono (CO)	28,67	1,94 x 10 ⁴
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	5,45	3,69 x 10 ⁵

Fonte: elaborado pela autora.

Em seguida, extraiu-se o centroide de cada polígono para verificar a sua elevação. Quanto à localização das áreas, efetuou-se através da extração das coordenadas UTM de cada vértice dos polígonos. A altura da fonte de emissão também foi definida em 1,0 m para este cenário.

Figura 10: Traçado dos polígonos ao longo das três vias da Avenida Beira Mar Norte.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

3.3.3 Eventos

Verificou-se a excedência aos padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 03/1990. Para tanto, solicitou-se na rotina do *AERMOD* a ocorrência de concentrações acima dos padrões, no tempo de amostragem estabelecido em Norma. A Tabela 14 indica estas informações, para os dois poluentes:

Tabela 14: Padrões nacionais primários e secundários de qualidade do ar para os poluentes dióxido de nitrogênio e monóxido de carbono

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário (µg/m³)	Padrão secundário (µg/m³)
Dióxido de nitrogênio	1 hora ¹	320	190
	MAA ²	100	100
Monóxido de carbono	1 hora ¹	40.000	40.000
	8 horas ¹	35 ppm	35 ppm
		10.000	10.000
		9 ppm	9 ppm

Fonte: CETESB (2015), com base na Resolução CONAMA N. 03/1990. Onde:

1 - não deve ser excedido mais de uma vez ao ano, 2 - média aritmética anual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de confrontar os resultados das fontes pontuais e área, os parâmetros de comparação utilizados foram: a área de abrangência das concentrações máximas e as excedentes aos padrões primários de qualidade do ar, e o número de casos em que os padrões primários e secundários foram excedidos.

Na etapa de análise do primeiro parâmetro, utilizaram-se mapas de isoconcentrações. Para tanto foram solicitadas como saída do modelo uma tabela com todas as maiores concentrações dos poluentes, em cada receptor. Com este resultado elaboraram-se mapas de isolinhas pela interpolação dos valores de concentração em cada ponto, através do *software Arcgis*.

Estes mapas foram elaborados com o intuito de verificar a área em que se excedia a média horária de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 , ou a média aritmética anual de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para o poluente CO, o objetivo era o mesmo, para a média de $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 8 horas de amostragem. Desta forma verificou-se a diferença entre os cenários. Também foram avaliados os bairros de abrangência da pluma de concentração de poluentes, uma vez que eles ultrapassaram os limites dos bairros onde se localiza a Avenida. Uma divisão dos bairros de Florianópolis localiza-se no Anexo C.

Para analisar o segundo parâmetro, foram elaborados mapas de frequência de eventos solicitando-se as tabelas de todas as concentrações em cada receptor que extrapolaram o padrão primário e o secundário de qualidade do ar. Destas tabelas, com o auxílio do *software MATLAB*, obteve-se o número de vezes em que se extrapolou o limite de concentração em cada receptor para cada um dos eventos. Como os padrões primários de ambos os poluentes admitem que o valor de referência seja ultrapassado somente uma vez no ano, avaliar o número de eventos excedentes torna-se imprescindível.

4.1 DISPERSÃO DE NO_2 NA AVENIDA

Para avaliar os efeitos da poluição na Av. Beira Mar Norte e em suas proximidades, utilizou-se as Figuras 11, 12, 13 e 14 para medir a área em que os padrões de qualidade do ar foram ultrapassados e verificar como a pluma do poluente NO_2 se dispersou. Enquanto as Figuras 15, 16, 17 e 18 foram usadas para avaliar a frequência de excedência aos valores de referência. As informações obtidas dos mapas de isoconcentrações e

de frequência foram resumidas na Tabela 13, e posteriormente discutidas em relação aos seus efeitos epidemiológicos.

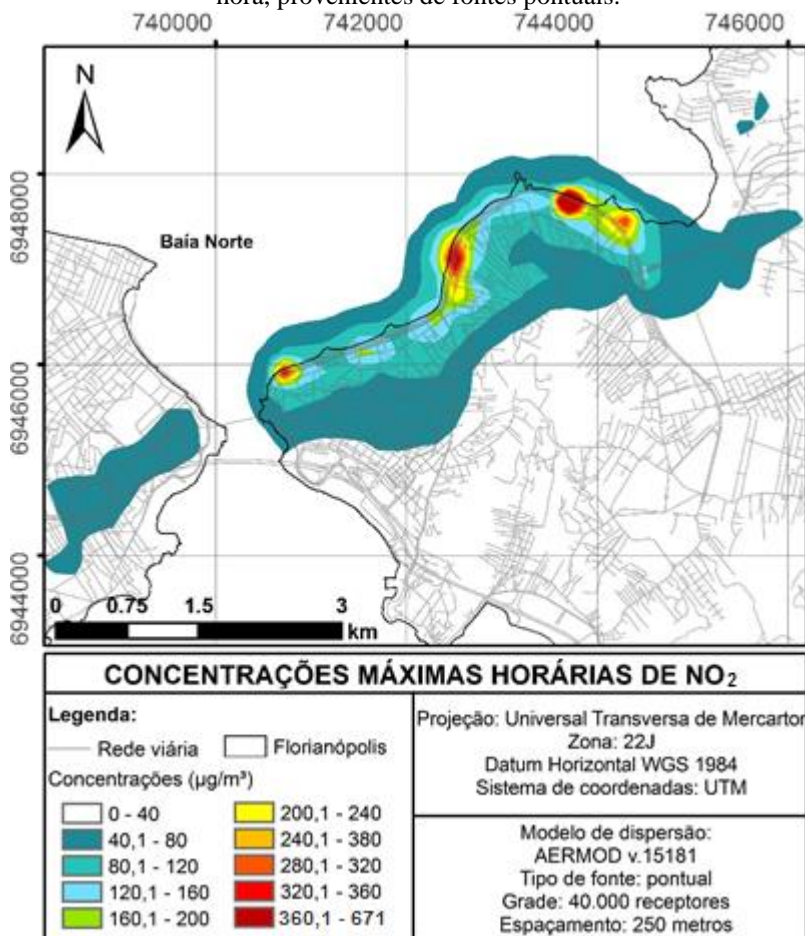
Ao comparar os mapas das Figuras 11 e 12, percebe-se que no caso das fontes pontuais, as concentrações máximas horárias foram críticas em 4 regiões distintas, enquanto as emitidas por fontes área, se estenderam ao longo de praticamente toda a Avenida. Este comportamento depende diretamente do tratamento diferenciado de cada tipo de fonte e da distância a que os receptores se encontram da superfície. Haja vista que a configuração pontual considera a elevação da pluma, ela resulta em concentrações menores em alturas mais próximas da superfície. Já a forma de área, por não incorporar a elevação da pluma, resulta em concentrações maiores em receptores próximos do solo.

Quando analisada a Figura 11 comparada ao modelo de elevação da Figura 8, torna-se evidente que as regiões críticas causadas pelas fontes pontuais encontram-se adjacentes às áreas de maior elevação do terreno.

As simulações que tinham como referência a média aritmética anual apresentaram menores disparidades entre os tipos de fontes, abrangendo as mesmas localidades, atingindo valores máximos não tão diferentes (diferença de 8%).

A Figura 11 apresenta 4 regiões em que as concentrações máximas horárias emitidas por fontes pontuais excederam o padrão primário de qualidade do ar, abrangendo 119.949,3 m², e o secundário, em 451.836,7 m². A pluma se estendeu ao longo de toda a Avenida, atingindo os bairros Agronômica e Centro com concentrações entre 40 e acima de 360 µg/m³; a Trindade e o Itacorubi receberam concentrações, até 120 µg/m³, e na porção continental, apenas concentrações até 80 µg/m³ foram identificadas, nos bairros Estreito, Capoeiras e Coqueiros.

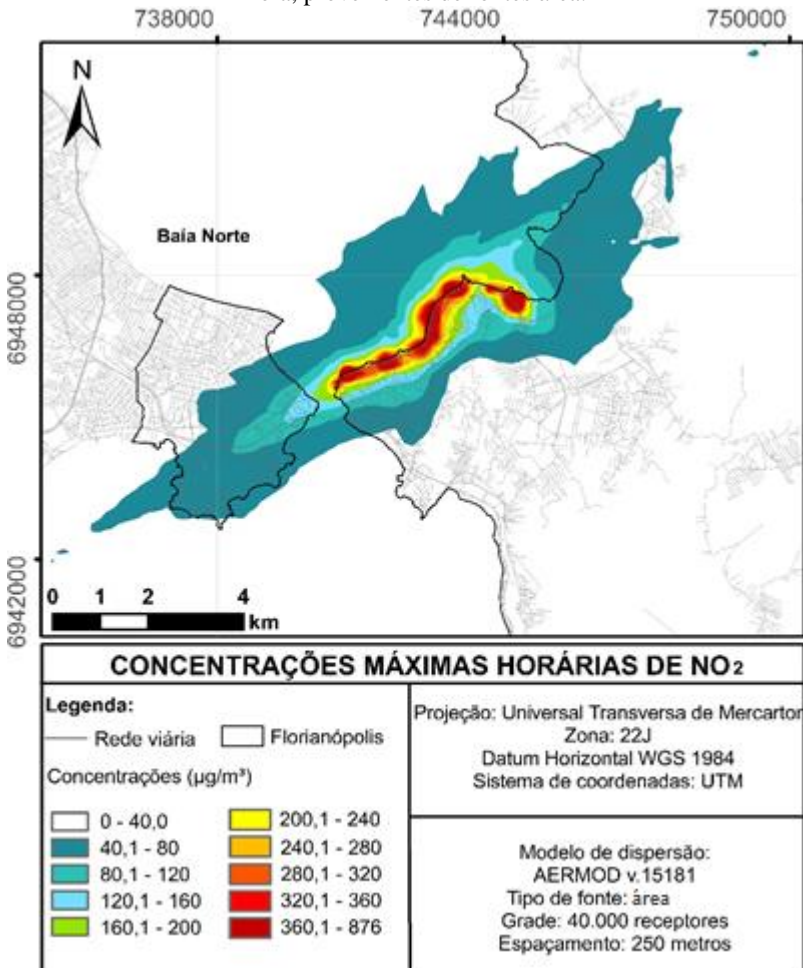
Figura 11: Concentrações máximas de NO₂ para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes pontuais.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

Já na na Figura 12, as concentrações acima do padrão primário se estenderam por 880.478,5 m², e acima do secundário por 3.038.644,4 m². Inclusive, maiores valores (até 160 µg/m³) alcançaram a parte continental, a Trindade e o Itacorubi, além do bairro João Paulo. Uma comparação da subtração das duas figuras apresenta-se no Apêndice A, item a, onde vê-se que próximo à Avenida as fontes área têm maiores concentrações, e longe, as pontuais se sobressaem.

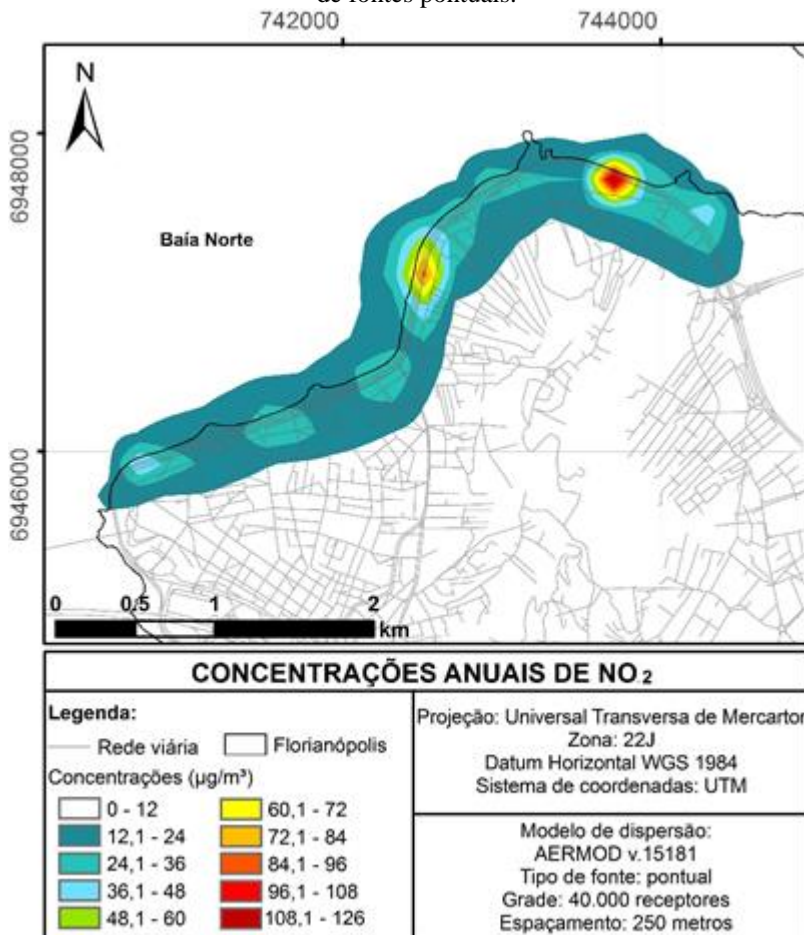
Figura 12: Concentrações máximas de NO₂ para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes área.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

Na Figura 13, em que a média aritmética anual não deveria ultrapassar $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, observou-se a excedência ao padrão em duas regiões no bairro Agronômica, com área total de $5.676,08 \text{ m}^2$. Concentrações menores, entre 12 e $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ foram encontradas no Centro. A parte continental não recebeu influência significativa das emissões veiculares na Av. Beira Mar.

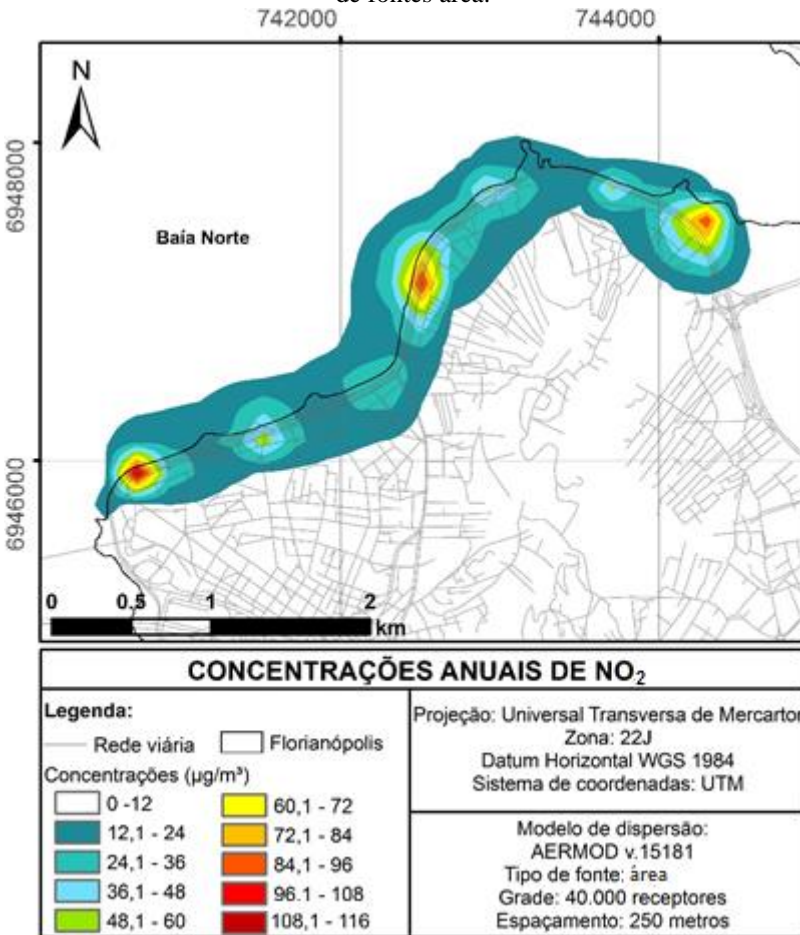
Figura 13: Concentrações médias aritméticas anuais de NO_2 , provenientes de fontes pontuais.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

A Figura 14, elaborada com fontes área, resultou em uma área menor que ultrapassou o valor de referência de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, totalizando $2.333,78 \text{ m}^2$ em três locais: dois na Agrônômica e um no Centro, únicos bairros ao alcance da pluma. Uma comparação exata da subtração das duas plumas de concentração apresenta-se no Apêndice A, item b, simulação em que foi verificado o maior alcance da poluição proveniente de fontes pontuais.

Figura 14: Concentrações médias aritméticas anuais de NO_2 , provenientes de fontes área.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

As emissões veiculares simuladas por fontes pontuais resultaram em 1519 horas em que o padrão primário foi excedido (Figura 15). Os locais afetados correspondem aos mesmos que apresentaram as maiores concentrações na Figura 11 e demonstram que o Bairro Agrônômica foi afetado mais vezes pelos picos de concentração.

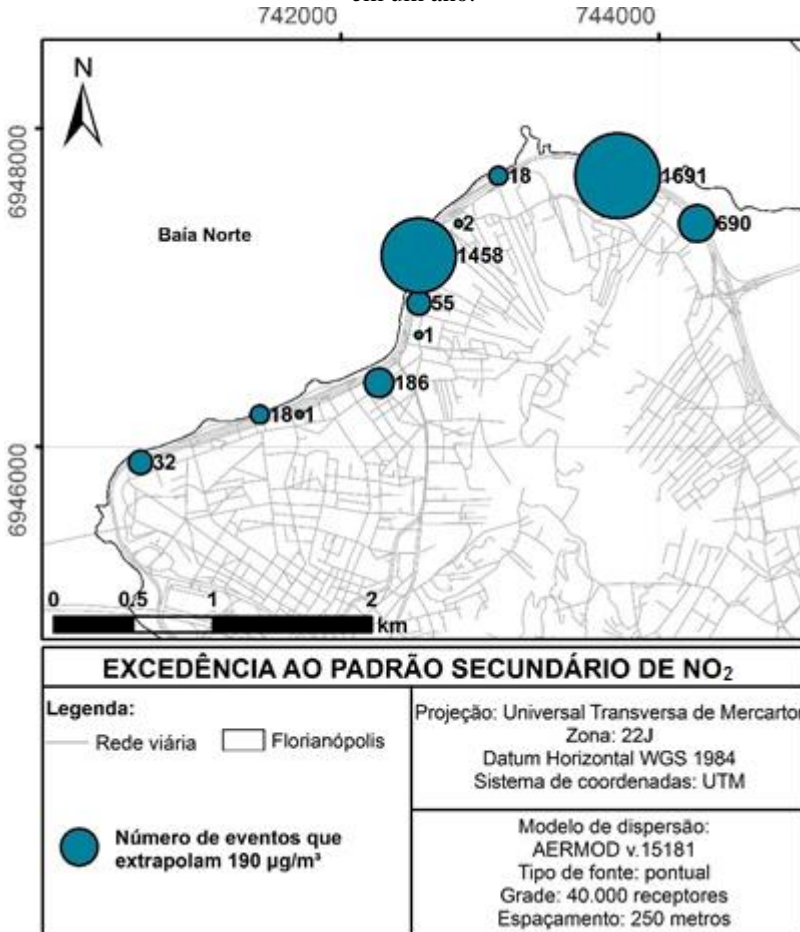
Figura 15: Número de vezes em que o padrão primário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO_2 emitido por fontes pontuais, foi excedido em um ano.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

Quando se considera o padrão secundário de qualidade do ar ($190 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a quantidade de vezes aumenta para 4152, se estendendo por toda a Avenida, principalmente no bairro Agronômica (Figura 16).

Figura 16: Número de vezes em que o padrão secundário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO_2 emitido por fontes pontuais, foi excedido em um ano.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

Já as fontes área ultrapassam mais vezes o padrão primário, totalizando 3386 ocorrências conforme a Figura 17. Percebe-se ainda que as concentrações são mais espalhadas ao longo da Avenida, assim como ocorre na Figura 12.

Figura 17: Número de vezes em que o padrão primário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO_2 emitido por fontes área, foi excedido em um ano.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

Um número muito maior resultou para o padrão secundário: 9074 ocorrências. Visualiza-se na Figura 18 que estes eventos ocorreram ao longo de toda a Av. Beira Mar Norte, com maior quantidade no bairro Agrônômica.

Figura 18: Número de vezes em que o padrão secundário de qualidade do ar, em relação ao poluente NO₂ emitido por fontes área, foi excedido em um ano.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

A Tabela 15 contém o alcance e a incidência das concentrações críticas obtidas das Figuras, de forma resumida:

Tabela 15: resumo das concentrações máximas encontradas, áreas que excedem aos padrões primários e secundários e número de ocorrências que extrapolam os padrões ao longo do ano, para o cenário pontual e área.

Fonte	Pontual	Área
Padrão primário	320 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h)	
Padrão secundário	190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h)	
Padrão de MAA	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Concentração máxima encontrada	670,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	875,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
MAA encontrada	125,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	116,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Área que excede ao padrão primário	11,99 ha	88,04 ha
Número de ocorrências que ultrapassaram o padrão primário	1519	3386
Área que excede ao padrão secundário	45,18 ha	303,86 ha
Número de ocorrências que ultrapassaram o padrão secundário	4152	9074
Área de excede à média aritmética anual	0,57 ha	0,23 ha

Fonte: elaborado pela autora.

Observando a Tabela 15, percebe-se que para o cenário de fonte pontual, o evento de excedência ao padrão primário ocorreu em uma abrangência de 11,99 hectares, em 4 localidades distintas ao longo da Avenida, totalizando 1519 vezes. Isto é, de acordo com a definição de padrão primário de qualidade do ar, os receptores dentro daquela área estavam vulneráveis a efeitos adversos na saúde. Enquanto isso, ainda considerando o mesmo cenário, à respeito da excedência ao padrão secundário, em 45,18 ha, durante 4152 ocorrências o valor de referência foi ultrapassado. Ou seja, conforme a definição de padrão secundário de qualidade do ar, apenas os receptores fora desta área enfrentaram o mínimo efeito adverso sobre o seu bem-estar; e o ambiente sobre a sua fauna e flora.

Pode-se ainda classificar a área em que foi ultrapassado o padrão primário como “Muito ruim”, de acordo com a classificação da Tabela 6, em relação aos efeitos epidemiológicos para concentrações entre 320 e

1130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, concentrações nesta faixa culminam em tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e na garganta, além de falta de ar e respiração ofegante em toda a população. Grupos sensíveis experimentam efeitos ainda piores. Enquanto isso, na região delimitada pela cor amarela – classificada como Qualidade Moderada - grupos sensíveis podem ser afetados por tosse seca e cansaço, sem prejuízo ao restante da população. Nesta região, os padrões primários de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde e pela Comissão Européia (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) já seriam excedidos.

Maiores ainda foram os resultados obtidos nas simulações de fontes área. O evento de excedência ao padrão primário ocorreu em uma abrangência de 88,04 ha, em 3386 ocorrências, e o secundário se estendeu por 303,86 ha, em 9074 ocorrências. Nesta frequência de incidência e abrangência de concentrações, o mesmo aplica-se para o cenário de área.

Apesar das concentrações máximas encontradas para os cenários pontual e área (670,9 e 875,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente) serem muito acima do que o definido pelos padrões de qualidade do ar, elas não ultrapassam o Nível de Alerta (1.130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) que compõe o Episódio Crítico de Poluição do Ar estabelecido pelo CONAMA Nº 03/1990. Considera-se que as concentrações máximas encontradas poderiam ser ainda maiores, pois o presente estudo utilizou emissões correspondentes ao fluxo médio de veículos, ao invés dos horários de pico. Por outro lado, ainda deve-se considerar que as concentrações de NO_2 adotaram a abordagem conservadora em relação ao NO_x , podendo apresentar valores menores na realidade.

As concentrações médias anuais dos cenários pontual e área ultrapassaram o valor limite de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, chegando a 125,8 e 116,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Comparando as médias anuais com o padrão brasileiro, já se pode verificar uma diferença. Esta diferença cresce ao confrontar com os padrões internacionais da Organização Mundial da Saúde e da Comissão Européia (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), indicando que no Brasil o valor de referência deste poluente é pouco restritivo.

As concentrações máximas horárias são compatíveis, porém um pouco maiores, do que o encontrado na revisão bibliográfica da Organização Mundial da Saúde, edição do ano 2000 das Diretrizes da Qualidade do Ar. No Reino Unido, as concentrações de dióxido de nitrogênio no entornos de avenidas são usualmente reportadas na faixa 470-750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Enquanto ao redor do mundo, foram reportadas médias aritméticas anuais de 20-90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, também inferiores ao encontrado em Florianópolis (OMS, 2000).

4.2 DISPERSÃO DE CO NA AVENIDA

Para avaliar os efeitos do poluente monóxido de carbono na Av. Beira Mar Norte e nos seus entornos, utilizou-se as Figuras 19 e 20 (nas próximas páginas) para verificar como a pluma do poluente se dispersou.

Nota-se que, diferente do dióxido de nitrogênio, para nenhum dos dois tipos de fonte os padrões de qualidade do ar (iguais para primário e secundário) foram excedidos. Também não foi possível fazer uma comparação com os padrões de qualidade do ar internacionais, pois os mesmos não são mais restritivos do que os brasileiros. Por não haver concentrações ultrapassando o valor de referência, este item não possui a Tabela Resumo.

Apesar de a pluma ser tratada da mesma forma pelo modelo para os dois tipos de poluentes, a dispersão parece ser ilustrada de forma diferente no mapa da Figura 19. Isto se deve aos intervalos maiores de concentrações de cada isolinha. Percebe-se, no entanto, que as regiões onde se visualizam concentrações de CO acima de $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, coincidem com as regiões críticas da Figura 11, evidenciando o mesmo tratamento das plumas, ainda que as taxas de emissão sejam diferentes.

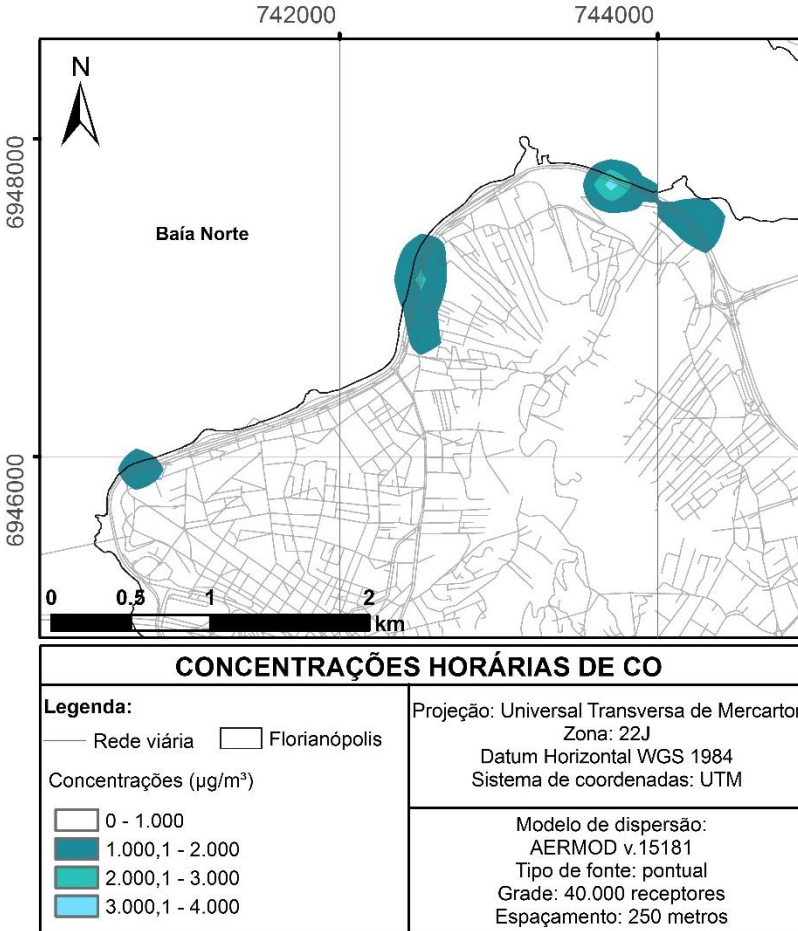
Concomitante, a dispersão no mapa da Figura 20 se assemelha ao das maiores faixas de concentração da Figura 12, pelo mesmo motivo. Assim como nas fontes pontuais, o poluente está presente nos bairros Centro e Agronômica. As fontes área, no entanto, chegam a uma faixa de concentração a mais do que as pontuais. Uma comparação exata da subtração das duas plumas de concentração apresenta-se no Apêndice A - item c, onde percebe-se que em algumas poucas localidades a concentração do cenário pontual foi maior.

Para as fontes pontuais, a maior concentração máxima horária encontrada foi igual a $3.528,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e para as fontes área, $4.608,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Em ambos os casos, o padrão de $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ está muito distante de ser atingido considerando apenas as emissões veiculares. Como as maiores concentrações também são muito inferiores ao padrão definido para a média móvel de 8 horas ($10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), concluiu-se que o mesmo também não ultrapassaria os limites estabelecidos em legislação e portanto não foram gerados mapas desses eventos.

Na Índia, cidade de Calicute, um estudo de 2008 apontou concentração máxima horária de $6.412 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes de emissões veiculares, em uma avenida da cidade (ANJANEYULU, 2008). No Brasil, na cidade de Aracaju/SE, para o horário de maior fluxo de veículos a concentração máxima horária encontrada foi de $13.400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Percebe-

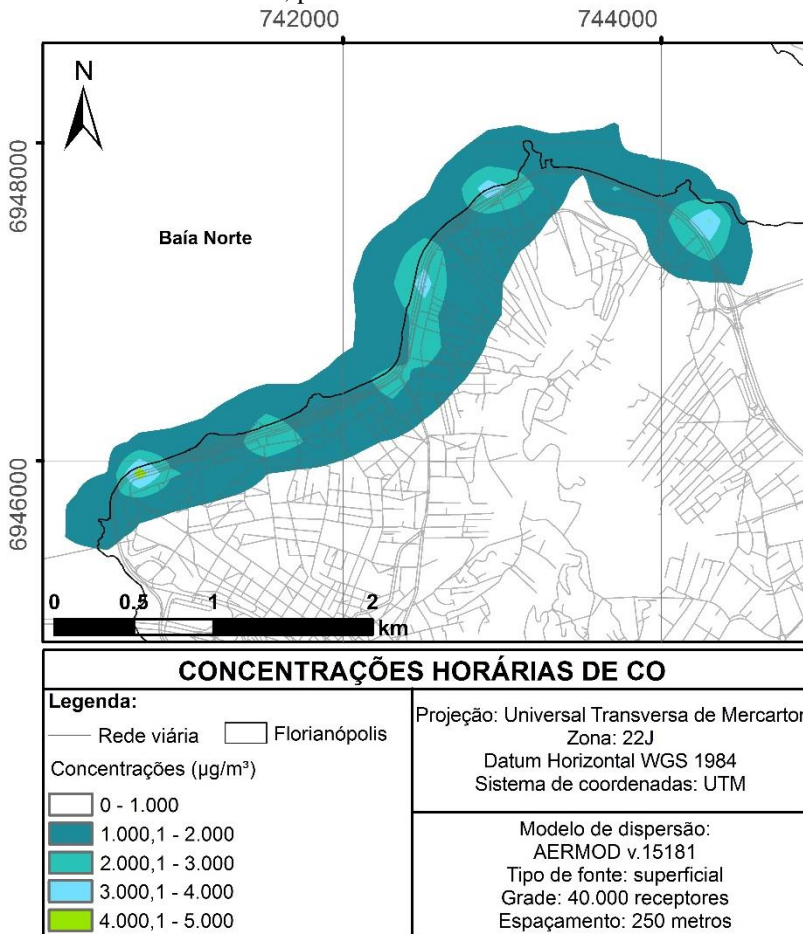
se que casos onde se avaliam horários de pico apresentam emissões ainda maiores do que as encontradas em Florianópolis em fluxo médio de veículos.

Figura 19: Concentrações máximas de CO para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes pontuais.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

Figura 20: Concentrações máximas de CO para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes área.



Fonte: mapa elaborado pela autora.

É importante ressaltar que as concentrações de monóxido de carbono encontradas correspondem apenas às contribuições veiculares. Portanto, evidencia-se a importância de um inventário de outros tipos de fontes.

5 CONCLUSÕES

Apesar de métodos de simulações por estimativas poder conter erros, na prática eles são importantes quando a área de estudo possui muitas variedades e quantidades de fontes poluidoras. Assim, a modelagem matemática das emissões veiculares na Avenida Beira Mar Norte justificou-se por produzir uma análise da contribuição das emissões veiculares dissociada das outras fontes de poluição.

Neste sentido, no presente trabalho utilizou-se o modelo *AERMOD* para analisar as concentrações de NO_2 e CO emitidas por fontes veiculares nos entornos da Av. Beira Mar Norte, em Florianópolis/SC. As rotinas foram elaboradas em dois cenários: o primeiro simulou as emissões móveis como fontes pontuais, e o segundo como área. Dentro destes cenários ainda avaliou-se a conformidade das concentrações encontradas com os padrões de qualidade do ar brasileiros. Os resultados de cada cenário foram comparados entre si para analisar as diferenças entre o comportamento das plumas, e assim poder contribuir com estudos futuros que busquem avaliar qual tipo de fonte se aproxima mais do problema real.

Durante a análise, pôde-se perceber que apenas considerando as emissões de NO_2 pelos veículos automotores, os padrões de qualidade do ar brasileiros estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 03/1990 foram excedidos. Estas concentrações chegaram em $670,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para fontes pontuais e $875,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para fontes área. Isto significa, de acordo com a definição do padrão primário, que a população em contato com as concentrações acima do limite primário estão expostas aos efeitos adversos da poluição do ar. Uma abrangência ainda maior ultrapassou os padrões secundários, e apenas fora desta área espera-se que a população, a fauna e a flora tenham contato com mínimos efeitos da poluição proveniente dos veículos.

Quando considerados também valores de referência ainda mais restritivos do que os brasileiros, estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde, US EPA e Comissão Européia, as concentrações de NO_2 encontradas causaram ainda mais preocupação. Considerando os efeitos epidemiológicos propostos pela OMS, as concentrações máximas encontradas estão dentro da faixa de valores onde espera-se agravos como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e na garganta, além de falta de ar e respiração ofegante em toda a população. Sendo que grupos sensíveis experimentam efeitos ainda piores. Sobre isso ainda é importante destacar que as pessoas utilizam a Avenida para fazer atividades que aumentam a

taxa de respiração (caminhas, corridas e esportes no geral), aumentando a sensibilidade da população em geral.

Em contrapartida, os padrões para o CO não ultrapassaram o limite estabelecido pela legislação brasileira, que se assemelha à internacional. As concentrações máximas encontradas alcançaram 3.528,7 e 4.608,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nas configurações pontual e área, respectivamente.

De forma geral, é possível perceber que os cenários com fontes área produziram plumas com maior alcance do que as fontes pontuais. O mesmo aconteceu considerando apenas as concentrações máximas horárias que extrapolaram os limites de concentração – as fontes pontuais produziram picos em regiões distantes entre si, e as fontes área ao longo de toda a Avenida. Atribuiu-se este comportamento ao tipo de tratamento da fonte e à elevação do receptor em relação à superfície.

Desta forma, percebeu-se que em relação às fontes área, fontes pontuais subestimaram concentrações máximas horárias. Em média, o número de ocorrências em desacordo com a legislação brasileira foi 121% maior no cenário área. Esta diferença diminuiu consideravelmente quando foram analisadas médias aritméticas anuais, pois a MAA de fontes área foram 7,7% menores do que as pontuais.

Os padrões primários de ambos os poluentes admitem que o valor de referência seja ultrapassado somente uma vez ao ano. No entanto, o número de casos excedentes em todos os cenários de NO_2 simulados foram milhares de vezes maiores, demonstrando que as concentrações máximas encontradas não foram casos isolados. Para o monóxido de carbono estes mapas não foram produzidos, pois as concentrações não excederam ao limite.

Os bairros mais afetados pelo monóxido de carbono foram o Centro e Agrônômica. Enquanto o dióxido de nitrogênio, além daqueles, ainda acometeram a Trindade, Itacorubi e João Paulo, na parte Insular, e o Estreito, Capoeiras e Coqueiros no Continente.

Concluiu-se, desta forma, que as emissões veiculares da Avenida Beira Mar Norte têm potencial eminente de oferecer riscos à saúde da população na região, e ainda prejudicar a fauna e flora nos entornos. Além disso ficou evidente que a qualidade do ar ambiente não deve ser tratada como um desafio exclusivo à localidade a qual pertencem as fontes. Por se tratar de um problema transfronteiriço, deve ser do interesse de todas as regiões nos entornos das fontes emissoras.

6 RECOMENDAÇÕES

A Avenida Beira Mar Norte localiza-se em uma região de intenso fluxo de pessoas e veículos. Por ser um local com as mais variadas práticas de esportes, possuir diversas estruturas voltadas ao lazer, e ainda por localizar-se na região central da cidade, acaba fazendo parte do cotidiano da maioria da população em Florianópolis. Desta forma, é importante que os diferentes papéis sociais e urbanos da região sejam atendidos sem prejudicar o bem-estar das pessoas ou o ambiente em seus entornos.

A qualidade do ar, por sua vez, está diretamente ligada a estas demandas. Portanto conhecer os fatores que interferem no ar ambiente e a demais fontes de poluição torna-se imprescindível. Neste sentido, os resultados deste trabalho apontam a urgência da elaboração de um inventário completo de emissões atmosféricas em Florianópolis, incluindo fontes móveis e fixas. Assim é possível conduzir estudos de dispersão de poluentes e avaliar o risco combinado de todas as fontes.

Exclusivamente em relação às emissões veiculares, os resultados do presente estudo demonstraram que é necessário interferir no modelo atual de mobilidade urbana em Florianópolis. Haja vista que apenas a fonte veicular já se mostrou capaz de ultrapassar os padrões de qualidade do ar, formas alternativas de transporte precisam ser incentivadas pela Secretaria Municipal de Transporte e Mobilidade Urbana. Esta medida precisaria primeiramente criar infraestrutura que possibilite e facilite o uso de bicicletas, tornando esta uma opção segura para a população.

Novas rotas de tráfego também precisam ser pensadas, pois como a Avenida Beira Mar Norte é a principal rota entre a Ilha e a parte continental da cidade, concentra uma grande contribuição de emissões veiculares na região. Caminhos novos pelos bairros adjacentes descongestionariam o fluxo de veículos e diminuiria a concentração da poluição em uma só região.

Como muitos fatores interferem na dispersão de poluentes, ainda que um modelo tenha sido testado e validado em inúmeros casos, o uso da ferramenta computacional não exclui a necessidade do monitoramento da qualidade do ar em campo. Portanto, como perspectiva de estudos futuros, ainda se observa a importância de monitorar a qualidade do ar com medições em pontos estratégicos da cidade, para garantir que as simulações de dispersão dos poluentes sejam as mais próximas da realidade possível.

Ainda no sentido de aproximar as simulações do problema real, alguns melhoramentos podem ser propostos empregando mais tempo e

melhores recursos computacionais. Primeiramente, em vista das altas concentrações de dióxido de nitrogênio obtidas, verifica-se a necessidade de um estudo aprofundado sobre a relação NO_2/NO_x na localidade, pois este é um fator fortemente influenciado pelas condições ambientais. Outra recomendação é verificar como fontes volumétricas responderiam a esta aplicação, para que entre as três configurações seja possível escolher a que melhor representa a realidade. Sugere-se, ainda, a utilização de um modelo de solução numérica para chegar a resultados mais refinados, aplicado à combinação de todas as fontes de poluição inventariadas da cidade. E por último, recomenda-se a utilização de um maior número de dados meteorológicos, que tenha o mínimo de dados horários faltantes, e que na falta de dados, os mesmos sejam preenchidos por modelos meteorológicos.

Conforme este trabalho demonstrou, as emissões veiculares na Avenida podem influenciar diretamente a saúde da população de Florianópolis. Portanto é importante também incentivar estudos epidemiológicos na localidade, que investiguem na prática quais são os resultados da poluição do ar. Neste sentido, as ações de controle da qualidade do ar devem incluir esforços conjuntos de órgãos do setor público, como a Secretaria de Saúde de Florianópolis, a Secretaria do Estado de Planejamento e as Universidades. Não obstante, como diversas medidas e estudos de controle da qualidade do ar demandam a participação da população, é importante que os órgãos públicos incorporem também medidas de sensibilização e conscientização da sociedade acerca do tema.

REFERÊNCIAS

ANJANEYULU, M. V. L. R. *et al.* **Modeling ambient carbon monoxide pollutant due to road traffic.** *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering.* v. 2, n. 5, 2008.

BRASIL. **Lei N. 6.938 de 31 de agosto de 1981.** *Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências.*

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – SECRETARIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E QUALIDADE AMBIENTAL. **1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários:** relatório final. jan. 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 018/1986.** *Dispõe sobre a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE.*

_____. **Resolução n. 003/1990.** *Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.*

_____. **Resolução n. 015/1995.** *Estabelece nova classificação de veículos automotores, para o controle de emissão veicular de gases, material particulado e evaporativa, considerando os veículos importados.*

_____. **Resolução n. 297/2002.** *Estabelece os limites para emissão de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos.*

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade do ar no Estado de São Paulo.** Série relatórios. 2015.

DALY, A.; ZANETTI, P. An introduction to air pollution – definitions, classifications and history. The Arab School for Science and Technology (ASST), The EnviroComp Institute, 2007. Disponível em: <<http://www.envirocomp.org/books/chapters/1aap.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). Frota de veículos (2016). Disponível em : < <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/237-frota-veiculos> >. Acesso em : 20 jan. 2017.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (Dinamarca). **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013**. Luxemburgo: Publications Office Of The European Union, 2013. Disponível em: <<http://eea.europa.eu/emep-eea-guidebook>>. Acesso em: 08 set. 2015.

FAIZ, A; WEAVER, C S; WALSH, P M. **Air pollution for motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions**. Washington, D.C: The World Bank, 1996.

FERNANDES, M. C. **Estimativa das emissões veiculares para CO, HC e NO_x na Avenida Beira Mar Norte em Florianópolis/SC**. 2014. 111 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Orientador: Dr. Leonardo Hoinaski.

FLORIANÓPOLIS. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico de Florianópolis**. 299p, 2011.

HEIST, D. et al. **Estimating near-road pollutant dispersion: a model inter-comparison**. *Transportation research*. Part D. v. 25. Pp. 93-105. 2013.

HOINASKI, L.. **Parametrização de coeficientes de dispersão lateral em modelos de qualidade do ar para previsões em tempos de média curtos**. 2015. 141p. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Orientador: Dr. Henrique de Melo Lisboa.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sinopse do censo demográfico 2010. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/> >. Acesso em: 10 nov. 2015.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos: computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MORAES, M. R.. **Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica**. 2004. 143p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Orientador: PhD. Clovis Raimundo Maliska.

MOREIRA, D e TIRABASSI, T. **Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para gestão ambiental**. *Ambiente & Sociedade*, vol. VII, n. 2, jul/dez 2004.

MOREIRA, D M; TIRABASSI, T; MORAES, M R. **Meteorologia e poluição atmosférica**. *Ambiente & Sociedade*, v. XI, n. 1, pp. 1-13, jan/jul 2008.

NEW ZEALAND. MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT – NEW ZEALAND NATIONAL INSTITUTE OF WATER AND ATMOSPHERIC RESEARCH. **Good practice guide for atmospheric dispersion modelling**. Wellington: 152 p. 2004.

PARLAMENTO EUROPEU E O CONSELHO. **Diretiva 2008/50/CE de 21 de maio de 2008**. *Relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa*. Jornal Oficial da União Européia.

PEREIRA JÚNIOR, J. S. **Legislação brasileira sobre poluição do ar**. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. p. 3-11, 2007.

ROBINS, A. **Comparison of ADMS and PRIME**. 8 p, 2000. Disponível em: < http://www.cerc.co.uk/environmental-software/assets/data/CERC_ADMS3_PRIME_building_modules.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017.

SÃO PAULO. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2015. 165 p. Disponível em: < <http://ar.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2013/12/RQAR-2015.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

SÃO PAULO. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar no estado de São Paulo: série de relatórios de 2014**. São Paulo: CETESB, 134 p, 2015. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: 20 set. 2015.

SEINFELD, J. H. e PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change**. New York: 1326 p. 2006.

SHEN, Thomas T. **Assessment of air pollution impact**. *Atmospheric Environment*, v. 20, n. 10, p. 2039-2045, 1986.

SPITZLEY, David V. et al. **Life cycle optimization of ownership costs and emissions reduction in US vehicle retirement decisions**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 10, n. 2, p. 161-175, 2005.

STINGELIN, F. S. *et al.* **Modelagem de dispersão de poluentes em uma avenida de Aracaju-SE**. XIII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Poços de Caldas. 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – **UNEP**. **Emerging issues in our global environment**. *Air Pollution: world's worst environmental health risk*. UNEP Year book. p. 42 - 47. 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **40 CFR Part 51**: 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. 2005. Disponível em: < http://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm >. Acesso em 10 set. 2015.

_____. **AERMOD**: Description of model formulation. 2004a. Disponível em: < http://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf >. Acesso em 10 set. 2015.

_____. **Users guide for the AMS/EPA regulatory model: AERMOD**. 2004b. Disponível em: < http://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf >. Acesso em 10 set. 2015.

_____. **National Ambient Air Quality Standards (40 CFR part 50)**. Disponível em: < <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> >. Acesso em 10 set. 2015.

_____. **40 CRF Part 51 Revisions to the guideline on air quality models: AERMOD Dispersion Modeling System and incorporation of approaches to address ozone and fine particulate matter.** 2017. Disponível em: < https://www3.epa.gov/ttn/scram/appendix_w/2016/AppendixW_2017.pdf>. Acesso em 20 jan. 2017.

_____. **Clarification os the use of AERMOD Dispersion Modeling for demonstrating compliance with the NO₂ National Ambient Air Quality Standard.** 2014. Disponível em: < https://www3.epa.gov/scram001/guidance/clarification/NO2_Clarification_Memo-20140930.pdf>. Acesso em 20 jan. 2017.

UNITED STATES ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY – OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT. **User’s guide for R-LINE Model v. 1.2:** a research line source model for near-surface releases. 33 p, 2013. Disponível em: < https://www.cmascenter.org/r-line/documentation/1.2/RLINE_UserGuide_11-13-2013.pdf>. Acesso em 30 jan. 2017.

VALLERO, D. **Fundamentals of air pollution.** Durham, North Carolina: Elsevier Inc, 2008.

VIEIRA, M. S. **Em busca do espaço livre e transitório.** *O futuro da cidade: Florianópolis.* Florianópolis: Editora UNISUL. pp. 63-81. 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (Dinamarca). **Air quality guidelines.** 2. ed. Copenhagen: WHO Regional Office For Europe, p. 273, 2000.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (Dinamarca). **Air quality guidelines:** particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office For Europe, p. 484, 2005.

**Anexo A – RELAÇÃO ENTRE QUALIDADE DO AR E EFEITOS EPIDEMIOLÓGICOS.
(CETESB, 2015)**

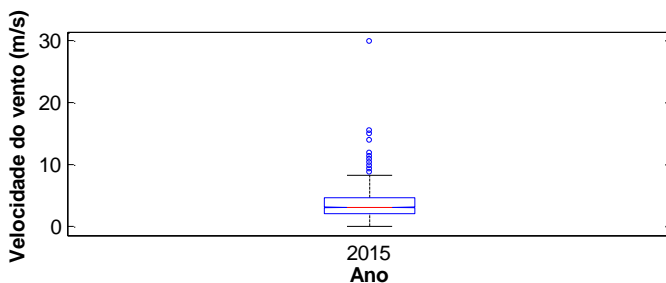
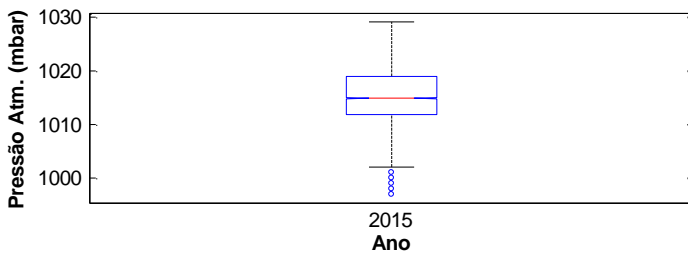
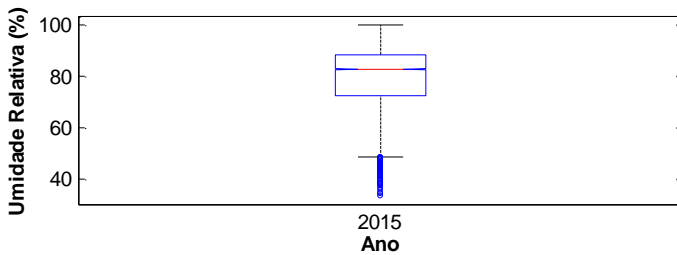
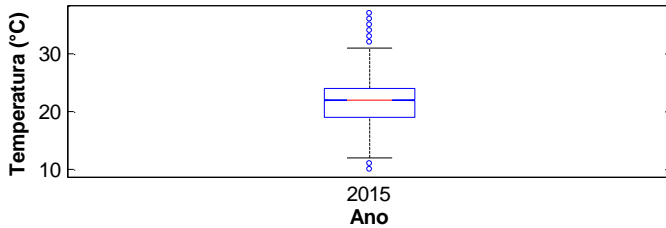
Qualidade	MP ₁₀	MP _{2,5}	O ₃	CO	NO ₂	SO ₂	Fumaça	Significado
	(µg/m ³) 24h	(µg/m ³) 24h	(µg/m ³) 8h	(ppm) 8h	(µg/m ³) 1h	(µg/m ³) 24h	(µg/m ³) 24h	
Boa	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20	0 – 50	
Moderada	> 50 – 100	> 25 – 50	> 100 – 130	> 9 – 11	> 200 – 240	> 20 – 40	> 50 – 100	Tosse seca e cansaço em pessoas de grupos sensíveis. O restante da população não é afetado.
Ruim	> 100 – 150	> 50 – 75	> 130 – 160	> 11 – 13	> 240 – 320	> 40 – 365	> 100 – 150	Tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e gargante em toda a população. Grupos sensíveis podem experimentar efeitos mais sérios.
Muito ruim	> 150 – 250	> 75 – 125	> 160 – 200	> 13 – 15	> 320 – 1130	> 365 – 800	> 150 – 250	Agravamento das condições do grupo N3, além de falta de ar e respiração ofegante em toda a população. Grupos sensíveis com efeitos ainda piores.
Péssima	> 250	> 125	> 200	> 15	> 1130	> 800	> 250	Sérios riscos de manifestação de doenças cardiovasculares e respiratórias. Efeitos ainda piores em grupos sensíveis.

**Anexo B – EMISSÕES VEICULARES DE CO E NO_x NA AV.
BEIRA MAR NORTE, DE ACORDO COM O TIPO E IDADE DO
VEÍCULO, DE 0 A 20 OU MAIS ANOS, EM g/s
(FERNANDES, 2014 adaptado pela autora)**

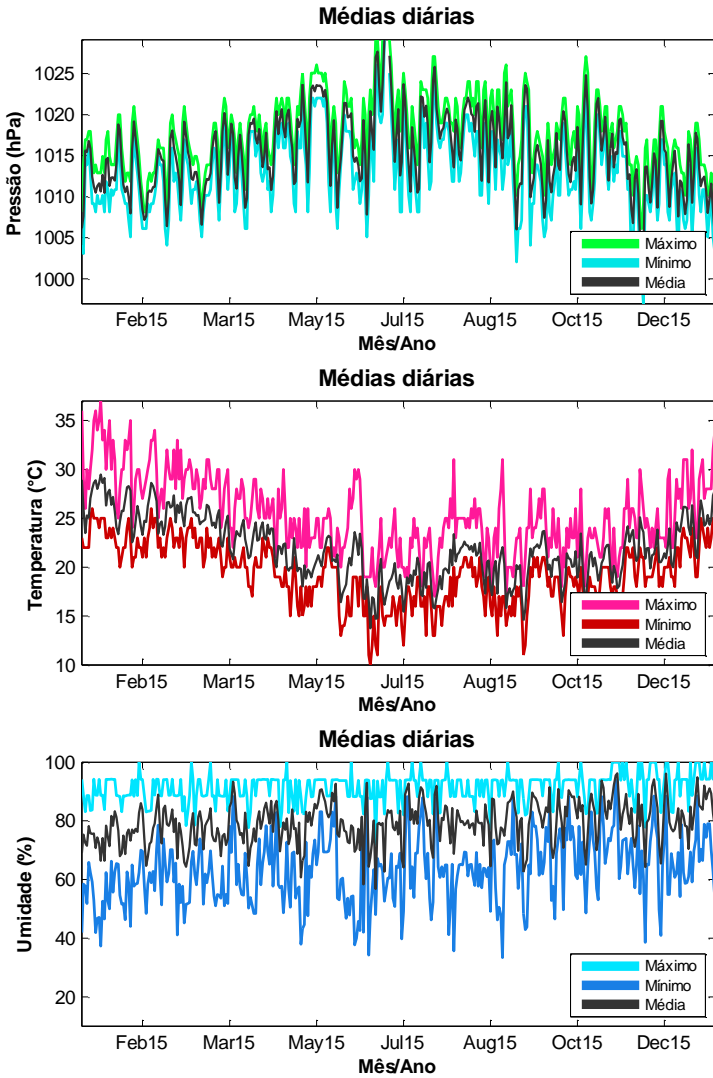
Idade anos	Automóveis		Com. Leves		Motocicletas		Caminhões		Ônibus	
	CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x
0	77,48	6,74	12,29	0,95	56,09	5,38	7,21	43,85	6,15	5,84
1	792,53	52,84	83,21	11,35	650,63	59,69	70,33	373,75	28,96	29,68
2	922,79	99,76	79,31	10,82	780,42	67,37	64,30	410,39	29,31	31,68
3	899,09	217,96	85,81	11,70	1118,64	104,49	68,32	436,04	36,64	39,60
4	741,11	179,66	70,21	9,57	1113,09	86,40	56,26	359,09	29,31	31,68
5	677,17	179,25	62,41	8,51	1194,77	71,87	48,23	307,79	21,99	23,76
6	678,47	174,46	61,11	8,33	2707,13	74,35	48,23	307,79	21,99	23,76
7	614,64	184,39	48,11	6,56	1757,40	52,30	41,96	305,55	23,05	28,26
8	500,64	139,71	36,41	4,96	1310,60	39,01	29,37	213,88	15,37	18,84
9	473,75	138,18	31,20	4,26	1131,88	33,69	46,45	187,94	28,25	19,30
10	604,00	173,75	26,00	3,55	923,38	27,48	38,71	156,62	14,12	9,65
11	533,55	165,83	22,10	3,01	804,23	23,94	43,14	247,92	15,72	15,28
12	592,95	172,63	23,40	3,19	863,81	25,71	43,14	247,92	15,72	15,28
13	921,96	230,49	24,70	3,37	863,81	25,71	43,14	247,92	15,72	15,28
14	2313,17	304,37	19,50	2,66	685,09	20,39	34,51	198,34	15,72	15,28
15	1972,17	251,77	13,00	1,77	476,58	14,18	25,89	148,75	15,72	15,28
16	3085,02	359,92	16,90	2,30	595,73	17,73	25,89	148,75	15,72	15,28
17	3574,37	453,89	18,20	2,48	655,30	19,50	34,51	198,34	15,72	15,28
18	2748,15	265,95	14,30	1,95	506,37	15,07	25,89	148,75	15,72	15,28
19	5437,20	614,64	14,30	1,95	536,16	15,96	25,89	148,75	15,72	15,28
20	4716,18	496,44	11,70	1,60	387,22	11,52	17,26	99,17	15,72	15,28
> 20	44960,92	4732,73	106,62	14,54	3842,45	114,36	181,20	1041,28	94,32	91,68

Anexo C – SÍNTESE DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO ANO 2015

a) diagramas de caixa dos dados originais de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento:

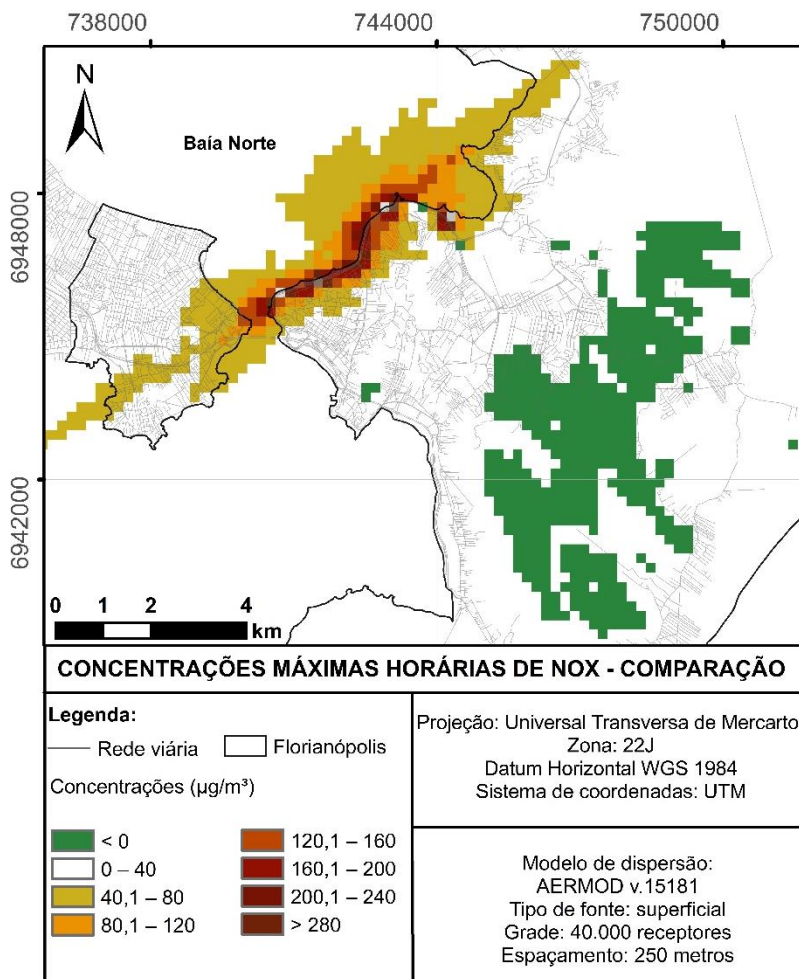


b) gráficos relativos às médias diárias, de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar:

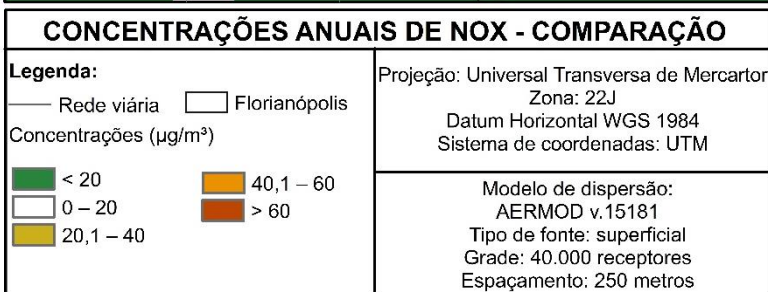
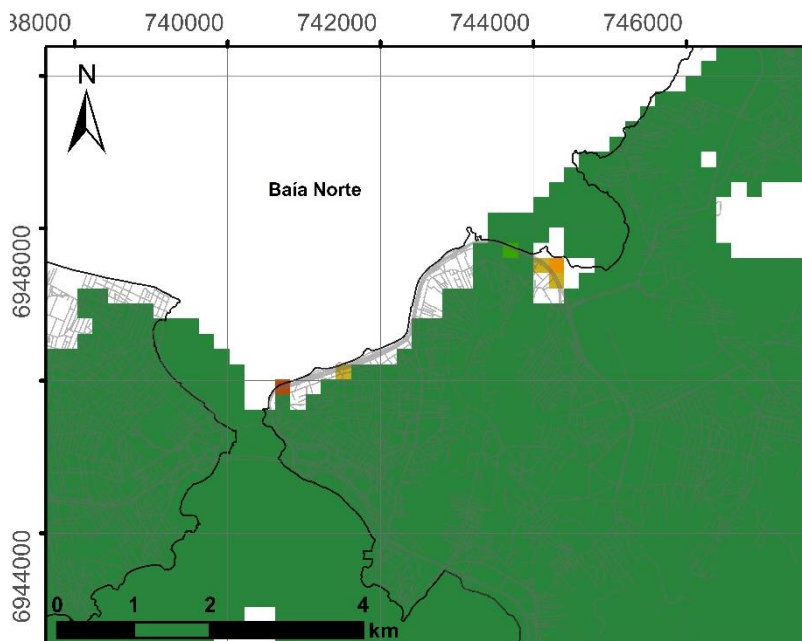


APÊNDICE A – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS

- a) **Subtração das concentrações máximas horárias de NO_x (Fonte área – Fonte pontual):** distantes das fontes, em verde, observa-se concentrações negativas, representando a área em que a fonte pontual obteve concentrações maiores do que as área. Nas outras faixas de cores, inclusive em branco, as fontes área apresentaram maiores concentrações.



- b) **Subtração das médias aritméticas anuais de NO_x (Fonte área – fonte pontual):** em verde observa-se concentrações negativas, representando a área em que a fonte pontual obteve concentrações maiores do que as de área. Nas outras faixas de cores, inclusive em branco, as fontes área apresentaram maiores concentrações.



- c) **Subtração das concentrações máximas horárias de CO (Fonte área – fonte pontual):** neste caso, em poucos lugares a pluma proveniente de fontes pontuais chegou a concentrações maiores do que a de fontes área (em tons de verde). Em branco e nos tons de amarelo e laranja, as fontes área se sobressaem.

