



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
NÚCLEO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

MAÍRA FEITOSA MENEZES MACÊDO

**AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA VEICULAR COM O
MODELO AERMOD EM AVENIDA DE ARACAJU – SE**

São Cristóvão (SE)

2016

MAÍRA FEITOSA MENEZES MACÊDO

**AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA VEICULAR COM O
MODELO AERMOD EM AVENIDA DE ARACAJU – SE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Núcleo de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Sergipe como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luis Dantas Ramos

São Cristóvão (SE)

2016

MAÍRA FEITOSA MENEZES MACÊDO

**AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA VEICULAR COM O
MODELO AERMOD EM AVENIDA DE ARACAJU – SE**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido e aprovado pela banca examinadora e pelo Núcleo de Engenharia Ambiental (NEAM) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) em 14 de junho de 2016 como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Luis Dantas Ramos - Orientador
Universidade Federal de Sergipe – CCET/NEAM

Prof. Dr. José Jailton Marques
Universidade Federal de Sergipe – CCET/NEAM

Eng. João Victor Maia d'Avila
Ambientec Consultoria Ambiental LTDA

A Deus pela criação, pelo amor que me sustenta e pelo dom do entendimento, dado através do seu Santo Espírito.

Aos meus pais que sempre incentivaram o melhor de mim, pelo amor, cuidado e suporte incondicional.

Aos estudantes, professores e profissionais da área ambiental pelo desenvolvimento da ciência por um mundo sustentável.

AGRADECIMENTOS

“Está em tuas mãos, Senhor”! Agradeço a Deus pela vida, pela felicidade, pela força, por ter me sustentado todo o tempo para que eu concluísse esse trabalho. Obrigada pelos sinais de Tua misericórdia na minha vida, pois eu não sou digna de que entreis em minha morada, mas o Senhor sempre cuidou dos meus caminhos, vem ao meu encontro.

A Maria, que me ensina a seguir seu Filho, que tem perfume de mil flores, mãe divina, mulher bendita, pela proteção e consolo em seu colo de mãe. Rogai por nós, ó mãe!

Aos meus pais Gilton e Luciene, manifestação maior do amor de Deus por mim, razões do meu viver, pelo amor incondicional, pela dedicação e por acreditarem em mim. Quero ser para meus filhos pelo menos uma mínima parte do que vocês são para mim.

Aos meus irmãos Filipe e Julianna, pelo companheirismo, conselhos, alegrias e desafios compartilhados, vocês são presentes de Deus.

Ao meu melhor amigo e namorado Max Mauro, pelo amor, incentivo e todos os conselhos durante toda a minha graduação. São 05 anos de união com muita engenharia e amor!

Aos meus familiares e amigos, por construírem minha história, por cultivarem em mim sentimentos bons e me ajudarem a viver alegrias e passar por dificuldades.

Aos colegas e amigos da UFS, pela união e pelo crescimento mútuo com todas as disciplinas, os seminários, os relatórios, os momentos e os eventos vividos juntos. Em especial aos que acompanharam de perto este trabalho e contribuíram para a sua realização.

Aos professores da UFS, em especial aos do NEAM por transferirem tanto conhecimento e nos mostrarem que o meio ambiente é uma peça complexa, que a engenharia é verdadeira arte da aproximação que nos permite enxergar o que os olhos de muitos não veem. Agradeço por nutrirem em seu coração o amor pelos alunos e pela ciência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Luis Dantas Ramos, exemplo de professor pela organização, dedicação e competência. Meu imenso obrigada pela disponibilidade e atenção e pela amizade que construímos durante a graduação. Juntos fizemos um belo trabalho!

A todos os colaboradores da Ambientec Consultoria Ambiental, em especial a Prof. João d’Avila e ao eng.ambiental João Victor d’Avila pelo exemplo de profissional, pelo suporte para a realização deste trabalho e por toda confiança depositada. Muito obrigada!

À SMTT, em nome de Alex Rick, da diretoria de Trânsito, pelo fornecimento de dados para o desenvolvimento deste estudo.

Minha sincera e profunda gratidão a todos que fazem parte da minha história!

Sabedoria, “aquele que a ama, ama a vida e Deus abençoará todo lugar que ele entrar” (Eclo 4, 13a,14b).

RESUMO

Um dos mais complexos problemas ambientais a serem enfrentados atualmente é a poluição do ar e os veículos automotivos são uma das principais fontes poluidoras do ar no meio urbano. Aracaju-SE enfrenta frequentes congestionamentos no trânsito em horários de pico e não possui uma rede de monitoramento da qualidade do ar que subsidie um diagnóstico e controle da poluição, logo, modelos matemáticos que estimam a concentração de poluentes são ferramentas úteis para a avaliação de impacto em receptores. Este trabalho consistiu numa avaliação da poluição veicular na Av. Pres. Tancredo Neves em Aracaju-SE por meio de simulações realizadas com o *software* AERMOD *View*, que utiliza o modelo gaussiano de dispersão atmosférica AERMOD, recomendado pela EPA. As modelagens foram realizadas para as duas vias de tráfego da avenida, consideradas como fontes lineares urbanas. A taxa de emissão da fonte foi calculada a partir de fatores de emissão, da velocidade média e do número de veículos contabilizados por filmagem que circulam na avenida em horários de pico. A partir de dados meteorológicos, topográficos e das fontes de emissão, obtiveram-se distribuições de concentrações de partículas totais suspensas, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio sobre a malha de receptores. Os mapas de dispersão obtidos mostraram que os poluentes concentraram-se em torno das fontes, devido ao lançamento a nível do solo, que as concentrações de PTS estimadas estavam dentro dos padrões primário e secundário da Resolução CONAMA Nº 03/90. Os valores de concentração de CO ultrapassaram os padrões com picos máximos de concentração de $53.199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 1h) e $27.560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 8h), devido à alta taxa de emissão das fontes. As concentrações de NO_2 também ultrapassaram os padrões primários e secundários para a média horária, atribuído à contribuição dos veículos pesados e das taxas de emissão dos veículos leves e motocicletas. Foi comprovada a maior exposição a níveis mais elevados de poluição dos receptores às margens da avenida. Recomendaram-se medidas de gestão da qualidade do ar e realização de mais estudos da fonte veicular e seus efeitos sobre a saúde da população. As simulações mostraram que as condições meteorológicas e topográficas da cidade de Aracaju favorecem a dispersão atmosférica de poluentes, que os veículos afetam significativamente a qualidade do ar da região e que a modelagem matemática é uma ferramenta útil para o estudo da dispersão atmosférica.

Palavras-chave: qualidade do ar, poluição veicular, dispersão atmosférica, AERMOD.

ABSTRACT

One of the most complex environmental problems to be faced today is the air pollution and automotive vehicles are one of the main sources of pollution of the air in urban areas. Aracaju-SE faces frequent congestion in traffic at peak times and does not have a monitoring network of air quality that subsidizes a diagnosis and control of pollution, so mathematical models that estimate the concentration of pollutants are useful tools for impact assessment receptors. This work consisted of an evaluation of vehicular pollution at Av. Pres. Tancredo Neves in Aracaju-SE through simulations with AERMOD View software, which uses the Gaussian model of atmospheric dispersion AERMOD recommended by the EPA. The modeling was performed for the two Avenue traffic routes, considered as urban linear sources. The rate of emission source was calculated from emission factors, average speed and the number of vehicles accounted for footage circulating on the promenade at peak times. From weather, topographic and sources of emission data yielded distributions of concentrations of total suspended particles, carbon monoxide and nitrogen oxides on the mesh receptors. The dispersion maps showed that the pollutants were concentrated around the sources, due to launch at ground level, the estimated PTS concentrations were within the primary and secondary standards of CONAMA Resolution No. 03/90. The CO concentration values exceeded the standards with maximum peak concentration of $53.199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (average 1 h) and $27.560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (average 8 h) due to the high rate of emission sources. NO_2 concentrations also exceeded the primary and secondary standards for hourly averages, attributed to the contribution of heavy vehicles and the emission rates of light vehicles and motorcycles. It has been proven to greater exposure to higher levels of pollution of receptors on the banks of the avenue. It was recommended air quality management measures and further studies of the vehicle source and its effects on health. The simulations showed that the meteorological and topographical conditions of the city of Aracaju favor the atmospheric dispersion of pollutants, that vehicles significantly affect air quality in the region and that the mathematical modeling is a useful tool for the study of atmospheric dispersion.

Key words: air quality, vehicle pollution, atmospheric dispersion, AERMOD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas da atmosfera e variação de temperatura e pressão por camada.....	20
Figura 2 – A cidade de Los Angeles (EUA) coberta por <i>smog</i> intenso em setembro de 1973	22
Figura 3 – Relação Ar/Combustível e a concentração de poluentes gerados no processo de combustão em veículos.....	30
Figura 4 – Variação do vento com a altitude e a rugosidade da superfície	43
Figura 5 – Rosa dos Ventos de Vitória-ES para o período de 2002 a 2003	45
Figura 6 – Perfil de temperatura em função da altitude para relacionar a taxa de declínio com a estabilidade atmosférica	47
Figura 7 – Divisão da troposfera em duas regiões: camada limite próxima à superfície e até em torno de 1 km e a atmosfera livre até os 11 km de altitude	50
Figura 8 – Estrutura da camada limite planetária com a presença da camada de mistura, camada residual, camada estável noturna e zonas de entranhamento.....	51
Figura 9 - Modelos de simulação e processo real que ocorre na atmosfera	53
Figura 10 – Esquema da pluma gaussiana.....	54
Figura 11 – Relação entre a pluma real e a pluma dada pelo AERMOD, caracterizada pela soma das duas possibilidades de pluma	60
Figura 12 - Esquema da Estrutura de Modelagem no AERMOD	61
Figura 13 – Mapa de Aracaju com as elevações em relação à nível do mar, em que os tons mais escuros indicam maiores altitudes e tons mais claros em tonalidade azul e verde menores altitudes.....	67
Figura 14 - Localização das duas vias do trecho da Avenida Tancredo Neves em estudo, Aracaju-Se. Via 01 (ícones amarelos) possui sentido bairro-centro e via 02 (ícones azuis) possui sentido centro-bairro.....	68
Figura 15 – Trânsito intenso de veículos na Av. Beira-Mar no dia 25/04/2016 às 07:21.....	69
Figura 16 – Trânsito intenso de veículos na Av. Beira-Mar no dia 25/04/2016 às 18:06.....	70
Figura 17 - Localização dos principais receptores na região de estudo	78

Figura 18 – Grade de receptores e curvas de altitudes do terreno na área de domínio da modelagem	82
Figura 19 – Rosa dos Ventos de Aracaju obtida com os dados meteorológicos de 2011 e 2012	84
Figura 20 - Mapa de dispersão diária de PTS na região da Av. Tancredo Neves	88
Figura 21 - Mapa de dispersão anual de PTS na região da Av. Tancredo Neves.....	89
Figura 22 - Mapa de dispersão horária de CO na região da Av. Tancredo Neves	92
Figura 23 - Mapa de dispersão para média de 8h de CO na região da Av. Tancredo Neves ...	93
Figura 24 - Mapa de dispersão horária de NO _x na região da Av. Tancredo Neves.....	96
Figura 25 - Mapa de dispersão anual de NO _x na região da Av. Tancredo Neves	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 03/90 .	37
Tabela 2 – Índice de Qualidade do Ar – CETESB para alguns poluentes.	40
Tabela 3 – Classificação da Atmosfera quanto à estabilidade por Pasquill-Gifford-Turner....	49
Tabela 4 – Fatores de Emissão em g/ km de veículos leves, motocicletas a gasolina, ônibus e caminhões a diesel.	71
Tabela 5 – Categorias de velocidades do vento e classificação da atmosfera.....	73
Tabela 6 – População residente nos bairros da área de estudo em 2007	74
Tabela 7 – Estimativa da População residente nos bairros da área de estudo em 2015 e densidade populacional	75
Tabela 8 - Taxa de emissão (g/km) por poluente e categoria de veículos.....	76
Tabela 9 – Número de Veículos circulantes na Av. Tancredo Neves	86
Tabela 10 – Concentrações máximas de PTS que atingem os principais receptores	91
Tabela 11 – Concentrações máximas de CO que atingem os principais receptores.....	95
Tabela 12 – Concentrações máximas de NO ₂ que atingem os principais receptores	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características principais e efeitos de poluentes indicadores da qualidade do ar .	32
Quadro 2 – Aparato legal nacional aplicado à qualidade e poluição do ar	36
Quadro 3 - Classes da Estabilidade Atmosférica por Pasquill-Gifford	48
Quadro 4 – Identificação e Classificação dos tipos de uso do solo por Auer Jr. (1978)	63
Quadro 5 – Médias de concentração estabelecidas para os padrões de qualidade do ar pela CONAMA N° 03/90	73
Quadro 6 – Coordenadas geográficas das vias 01 e 02 da Av. Tancredo Neves em estudo	76
Quadro 7 – Localização dos receptores principais discretos inseridos no modelo	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AERMIC	<i>AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMS	<i>American Meteorology Society</i>
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etileno e Xileno
CAA	<i>Clean Air Quality</i>
CEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CETESB	Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
C ₆ H ₆	Benzeno
CLP	Camada Limite Planetária
CLC	Camada Limite Convectiva
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
DEM	Digital Elevation Model
EC	European Commission
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GNV	Gás Natural Veicular
HCS	Hidrocarbonetos
HEI	Health Effect Institute
HNO ₃	Ácido nítrico
HPA	Hidrocarboneto poliaromático
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
I/M	Programa de Inspeção e Manutenção Veicular
ISC3	<i>Industrial Source Complex</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
N ₂	Nitrogênio

NAAQS	<i>National Ambient Air Quality Standards</i>
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Íon amônio
N ₂ O	Óxido nitroso
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO ₃	Nitrato
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OLM	<i>Ozone Limiting Method</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
Pb	Chumbo
PCPV	Programa de Controle da Poluição Veicular
PRIME	<i>Plume Rise Model Enhancements</i>
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Poluição do Ar por Ciclomotores, Motociclos e Similares
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PTS	Partículas Totais Suspensas
SMTT	Secretaria Municipal de Trânsito e Transporte
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
SRTM37	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Objetivo Geral	19
1.2. Objetivos Específicos.....	19
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1. Poluição Atmosférica.....	20
2.2. Poluição Atmosférica Veicular	23
2.2.1. Poluentes Atmosféricos e Efeitos	31
2.2.2. Saúde e Exposição da população	34
2.3. Legislação	35
2.3.1. Nacional	35
2.3.2. Internacional.....	41
2.4. Dispersão de Poluentes Atmosféricos	42
2.4.1. Vento e Turbulência.....	42
2.4.2. Temperatura e Albedo.....	46
2.4.3. Estabilidade atmosférica	46
2.4.4. Topografia.....	49
2.4.5. Camada Limite Planetária.....	50
2.5. Modelos Matemáticos.....	52
2.5.1. Modelo Gaussiano.....	54
2.5.2. Modelo AERMOD	57
3. METODOLOGIA	66
3.1. Descrição da Área de Estudo.....	66
3.1.1. Município de Aracaju-SE.....	66
3.1.2. Área em estudo.....	67
3.2. Dados de Entrada no AERMOD.....	70

3.3. Modelagem Matemática.....	72
3.3.1. Dados Meteorológicos e Obtenção da Rosa dos Ventos.....	73
3.3.2. Cenário de Modelagem	73
3.3.3. Dados da Fonte de Emissão	76
3.3.4. Receptores	77
3.3.5. Modelagem dos Óxidos de Nitrogênio	79
3.4. Apresentação dos Resultados	80
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1. Grade de receptores e Elevações de terreno	81
4.2. Rosa dos Ventos	83
4.3. Fluxo de Veículos.....	85
4.4. Simulações no AERMOD View	87
4.4.1. Partículas Totais Suspensas (PTS).....	87
4.4.2. Monóxido de Carbono (CO)	91
4.4.3. Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	95
5. RECOMENDAÇÕES.....	100
6. CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS.....	104

1. INTRODUÇÃO

A realidade do mundo atual, que visa a conciliação da manutenção da vida e do meio ambiente com o crescimento socioeconômico por meio do desenvolvimento sustentável, enfrenta diversos desafios como o controle da poluição do ar. O ar atmosférico é um atributo ambiental essencial à vida no planeta, pois nele encontram-se gases, partículas sólidas e líquidas necessários à estrutura e ao metabolismo dos seres vivos. A alteração de sua qualidade interfere em uma escala local na saúde e no bem-estar dos seres vivos, na estrutura de materiais e em uma escala regional e global no clima e no meio ambiente como um todo, tornando-se um tema com grande relevância no Brasil e no mundo.

Segundo Ghobadi e Khodakarami (2016), a poluição do ar é um dos problemas mais críticos causados pela civilização industrial e o mais complexo dentre os problemas atuais. A composição do ar atmosférico varia com o aporte ou a retirada de substâncias tanto por fontes naturais como atividades antrópicas, que ao gerarem e emitirem em excesso matéria ou energia, tornam-se uma das principais fontes de poluição do ar. O uso de combustíveis fósseis para geração de energia, as emissões gasosas provenientes de processos industriais, veículos automotores e queimadas são as maiores fontes de substâncias poluentes introduzidas no ar (BRASIL, 2016).

O setor de transporte é um dos que mais contribuem em uma escala global para a geração de gases de efeito estufa e o aquecimento global. Este setor representou 27% das emissões de gases de efeito estufa nos Estados Unidos em 2013, apenas com menor contribuição que o setor de energia no país (EPA, 2015). Numa escala regional, segundo HEI (2010), emissões de motores de veículos automotivos são fontes significativas para a poluição do ar urbano, o aumento da frota de veículos e consequente aumento de emissões, devido ao crescimento e desenvolvimento econômico da população, constituem-se num fator de risco para diversos problemas de saúde da população urbana (SU et al, 2015).

A má qualidade do ar é um problema de saúde pública em vários países. Estudos mostram que níveis elevados de concentração de material particulado em suspensão no ar, associados a longos períodos de exposição, causam o aumento de atendimentos nas emergências de hospitais e até de mortes prematuras, devido aos problemas cardiovasculares e respiratórios crônicos adquiridos e/ou intensificados pela poluição. Exposição curta a níveis altos de poluição também causam efeitos adversos à saúde humana, como ataques de asma, irritação da pele e mucosas, sensação de desconforto e sufocamento, principalmente em grupos mais vulneráveis como crianças e idosos (EPA, 2003).

Em centros urbanos, a população está exposta também ao monóxido de carbono (CO), poluente com efeito asfixiante e que pode levar à morte. Dois terços das emissões deste poluente são oriundos do setor de transporte, por meio da combustão incompleta de combustível, e em áreas urbanas, a contribuição dos motores de veículos para poluição por CO pode exceder 90%, o que constitui uma grande preocupação para a saúde da população (EPA, 1993; ÁLVARES, 2002).

No Brasil, a frota de veículos cresce anualmente e nas grandes metrópoles como São Paulo, a poluição do ar oriunda das emissões de poluentes por veículos é um desafio a ser vencido. Aracaju, capital de Sergipe, apresentou aumento da frota de veículos ao longo dos anos, atingindo atualmente o número de 284.681 veículos (DETRAN-SE, 2016). Com isso o trânsito de veículos se intensificou, provocando cada vez mais engarrafamentos em suas principais avenidas, como a Avenida Tancredo Neves, que liga a zona sul à zona oeste da cidade. O problema de trânsito intenso e alto fluxo de veículos em circulação, apesar dos veículos fabricados desde os anos 90 gerarem menos poluentes, aumentam a contribuição dessa fonte para poluição urbana e o risco de problemas de saúde e bem-estar da população local.

Dada a relevante e atual importância da poluição atmosférica, o seu conhecimento e controle inserido numa gestão da qualidade do ar eficiente é imprescindível. Para o controle vinculado ao cumprimento das legislações vigentes, como a Resolução CONAMA Nº 03 de 1990, que estabelece padrões de qualidade do ar, é necessário a avaliação da qualidade do ar viabilizada pelo monitoramento e diagnóstico da área em estudo. No entanto, como em Aracaju não há uma rede de monitoramento que permita uma avaliação da qualidade do ar satisfatórios, instrumentos como modelos numéricos de estimativas são necessários.

Modelos matemáticos são importantes ferramentas em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos, pois estimam a concentração de poluentes emitidos e geram curvas de distribuição de concentração úteis para a avaliação da qualidade do ar. Além disso, esta ferramenta, conforme Rosa (2012), viabiliza a verificação de impactos ambientais negativos causados por uma fonte e visa suprir a escassez de dados experimentais de monitoramento.

O AERMOD é um modelo matemático de dispersão atmosférica recomendado pela Agência Ambiental Americana (EPA) para avaliação da qualidade do ar. A partir das características meteorológicas, do terreno e dados das fontes de emissão gera curvas de distribuição gaussiana que permite avaliar a dispersão da pluma na camada limite atmosférica, de maneira que são obtidas estimativas das concentrações de poluentes sobre uma malha de receptores. Este modelo é amplamente utilizado para fontes pontuais e pode ser utilizado para

fontes de área e de linha, como avenidas com trânsito de veículos, em ambientes rurais e urbanos. Diante das limitações de medidas experimentais, este modelo matemático constitui-se numa ferramenta muito útil e promissora para avaliação da qualidade do ar (EPA, 2005).

Diante dessa problemática da poluição atmosférica no contexto do desenvolvimento sustentável, em que é necessário caminhar para uma gestão eficiente da qualidade do ar, este trabalho visa, por meio de simulações matemáticas realizadas pelo *software* AERMOD View, avaliar a contribuição da fonte veicular móvel sobre a qualidade do ar em área de fluxo intenso de veículos e alta densidade populacional na capital sergipana. Constitui-se, portanto, num estudo importante para o conhecimento da qualidade do ar na cidade, a verificação da necessidade de implantação de rede de monitoramento e de realização de ações de controle de poluição pelo órgão público responsável, a fim de salvaguardar a preservação do meio ambiente e a saúde, a segurança e o bem-estar da população.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a poluição atmosférica veicular, por meio de simulações de distribuição de concentração de poluentes com o auxílio do *software* AERMOD View, em avenida com fluxo intenso de veículos, no município de Aracaju, capital do estado de Sergipe, Brasil.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar levantamento bibliográfico a fim de reunir informações e dados sobre poluição atmosférica, fonte poluidora veicular e importância da modelagem matemática para a predição de distribuição de concentração de poluentes.
- Disseminar o tema de poluição atmosférica e uma de suas principais fontes que é o setor de transporte, a fim de ampliar o conhecimento na área.
- Realizar a caracterização da área de estudo e coletar dados necessários para a correta avaliação da emissão de poluentes atmosféricos pelos veículos automotivos.
- Obter as distribuições de concentração de monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e partículas totais suspensas emitidos pelos veículos automotivos na área em estudo a partir do modelo AERMOD.
- Analisar os mapas de dispersão de concentrações obtidos e compará-las com os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 03 de 1990.
- Avaliar as concentrações dos poluentes modelados a que os receptores de interesses estão expostos.
- Propor medidas para a gestão da qualidade do ar do município de Aracaju-SE.

2. REVISÃO DA LITERATURA

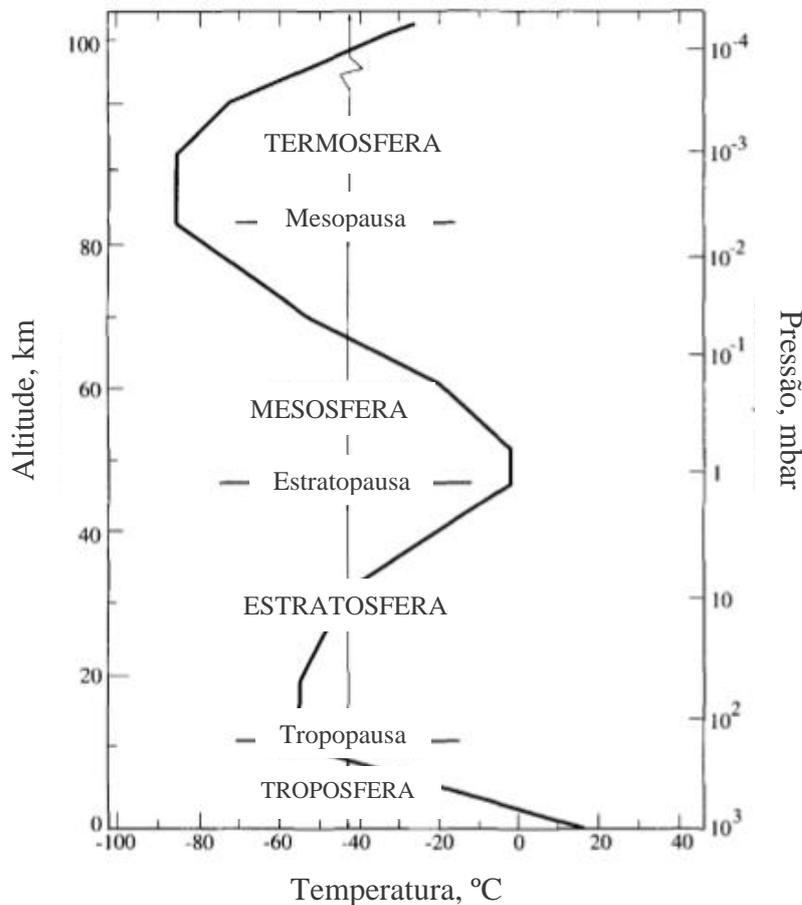
Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados à Poluição Atmosférica, à fonte veicular, aos modelos matemáticos de dispersão atmosférica, ao modelo AERMOD utilizado, além de uma apresentação da legislação relacionada ao tema.

2.1. Poluição Atmosférica

A atmosfera é a camada da Terra composta por uma mistura de gases e partículas: aproximadamente 78% de nitrogênio (N_2), 21% de oxigênio (O_2), 1% de outros gases, como argônio, hidrogênio, hélio, dióxido de nitrogênio, dióxido de carbono, e outros constituintes como vapor de água, material particulado e cristais de sais (LEMOS, 2010).

A atmosfera é dividida em camadas que possui diferentes perfis de pressão e temperatura conforme a altitude (Figura 1).

Figura 1 - Camadas da atmosfera e variação de temperatura e pressão por camada



Fonte: Adaptado de Seinfeld e Pandis, 2006.

A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera, com altitude de até 10 a 15 km da crosta terrestre até a tropopausa. Nesta camada há forte mistura vertical do ar, com movimentos turbulentos e a temperatura diminui com a altitude, a uma taxa em condições neutras de 1 °C/100 m. Da tropopausa a estratopausa, encontra-se a estratosfera, que atinge 55 km de altitude e onde está concentrado o ozônio. Na estratosfera, ocorre um processo inverso, a temperatura aumenta com a altitude, devido à absorção de radiação ultravioleta pelo ozônio e a mistura vertical é baixa. Acima desta camada, está a Mesosfera que se estende até 90 km e apresenta o ponto mais frio da atmosfera, em torno de -90 °C. A camada da atmosfera acima de 90 km de altitude é a termosfera, caracterizada por altas temperaturas devido à absorção de radiação por moléculas de nitrogênio e oxigênio. Nesta camada, ocorre rápida mistura vertical e íons são produzidos por fotoionização. Em altitudes maiores que 500 km, está a exosfera, camada atmosférica onde gases podem não sofrer influência da força gravitacional da Terra (SEINFELD E PANDIS, 2006).

A camada de maior interesse para os estudos de dispersão de poluentes e seus efeitos é a troposfera, pois é a camada mais próxima da superfície, onde os fenômenos climáticos de manutenção da vida na Terra e os relacionados com a poluição do ar ocorrem (LEMOS, 2010).

O ar presente na atmosfera é essencial para a manutenção da vida e é um recurso ambiental bastante utilizado para o metabolismo dos seres vivos, a comunicação e para o transporte de substâncias resultantes de fenômenos naturais e de atividades antrópicas. Alteração da atmosfera pode ocorrer por processos naturais como emissão de gases por erupções vulcânicas, decomposição dos seres vivos, emissão de hidrocarbonetos voláteis pelas plantas, ozônio e óxidos de nitrogênio por descargas elétricas, e por processos antropogênicos, que causam impactos ao meio ambiente e à saúde das pessoas (DERÍSIO, 2012; GODISH, 2004).

O descobrimento do fogo e sua utilização foi a primeira grande contribuição humana para alteração do ar com o aporte dos gases provenientes da queima de galhos e árvores. O uso do carvão em larga escala como combustível e a revolução industrial aumentou ainda mais a dimensão dos problemas com a qualidade do ar (GODISH, 2004). As inúmeras atividades dos seres humanos como desmatamento, produção industrial, transporte associadas aos fenômenos meteorológicos na troposfera geram e emitem para a atmosfera grandes quantidades de substâncias nocivas, o que torna a poluição atmosférica uma grande preocupação mundial.

A poluição do ar pode ter dimensões local, regional e global. Quando seus efeitos concentram-se em uma região relativamente pequena, possui uma escala local, quando os poluentes se dispersam e atingem outras regiões, a poluição atinge uma escala regional e quando a poluição envolve toda a ecosfera, caracterizada pelos problemas de efeito estufa, chuvas ácidas e destruição da camada de ozônio, é um fenômeno global (LEMOS, 2010).

A nível local, a poluição do ar pode gerar episódios críticos que dependem das condições climáticas, os chamados *smogs* (neblinas). A partir do século 19, em Londres e outras cidades britânicas industriais, situações de extrema redução de visibilidade, doenças e até mortes ocorreram devido a *smogs* provocados por produtos da combustão de carvão nas indústrias (GODISH, 2004). Derísio (2012) relata que episódios críticos possuem características em comum, como combinação de aerossóis e poluentes gasosos, condições meteorológicas atípicas e aumento de mortalidade. A Figura 2 é um registro de *smog* intenso que cobriu a cidade de Los Angeles, nos Estados Unidos em setembro de 1973.

Figura 2 – A cidade de Los Angeles (EUA) coberta por *smog* intenso em setembro de 1973



Fonte: NATIONAL ARCHIVES CATALOG, 2016.

Há várias fontes de poluição do ar que podem ser classificadas como fontes estacionárias ou fixas, como chaminés, que são representadas por um ponto de emissão, e fontes móveis, como os veículos automotores que formam linhas vias emissoras de poluentes.

Segundo Brasil (2016b), fontes fixas ocupam área limitada que permite avaliação da fonte diretamente e compreendem as atividades industriais de mineração, energia e de transformação. A Comissão Europeia (EC) apresenta que as fontes fixas usinas de produção de energia elétrica, aquecedores de residências e estabelecimentos comerciais, atividades industriais e da construção civil são responsáveis por 95 % das emissões de dióxido de enxofre (SO_x), 75 % de material particulado (MP), 42 % de óxidos de nitrogênio (NO_x), 76 % de compostos orgânicos voláteis (COVs) da União Europeia, e as fontes móveis, como veículos automotores, navios e máquinas (tratores), emitem 1% de SO_x, 18 % de MP, 49 % de NO_x e 14 % de COVs (EC, 2016a).

O conhecimento e gerenciamento dessas fontes são fundamentais para o controle da poluição atmosférica e, assim, minimizar efeitos adversos à saúde da população, que vão desde desconforto, irritações respiratórias a doenças crônicas, câncer e morte.

2.2. Poluição Atmosférica Veicular

Veículos automotores, caminhonetes, caminhões, ônibus, aviões, barcos, trens se movimentam e emitem poluentes, constituindo-se fontes móveis poluidoras, com destaque para os veículos automotores, como carros em grande quantidade nas áreas urbanas (COOPER E ALLEY , 2011; DERÍSIO, 2012).

Em grandes centros urbanos, o setor de transporte é um dos que mais cresceram ao longo das últimas décadas. Especialmente, em países em desenvolvimento como o Brasil, em que o deslocamento principal das pessoas se dá por rodovias e o transporte público é ineficiente e mal dimensionado, o aumento do número de veículos em uso nas cidades tem provocado o problema de congestionamentos, o que acarreta num aumento da poluição atmosférica, assim como outros problemas urbanos associados, como perda de tempo e produtividade, estresse e aumento do consumo de combustíveis (SZWARCFITER, 2004).

Oliveira et al. (s.d.) afirmam que nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, a poluição do ar resultante do tráfego de veículos é um problema que cresce nas metrópoles, embora o incentivo à produção e utilização de combustíveis mais limpos e à construção de veículos que emitem menos poluentes. Medições de poluentes na cidade de Porto, em Portugal,

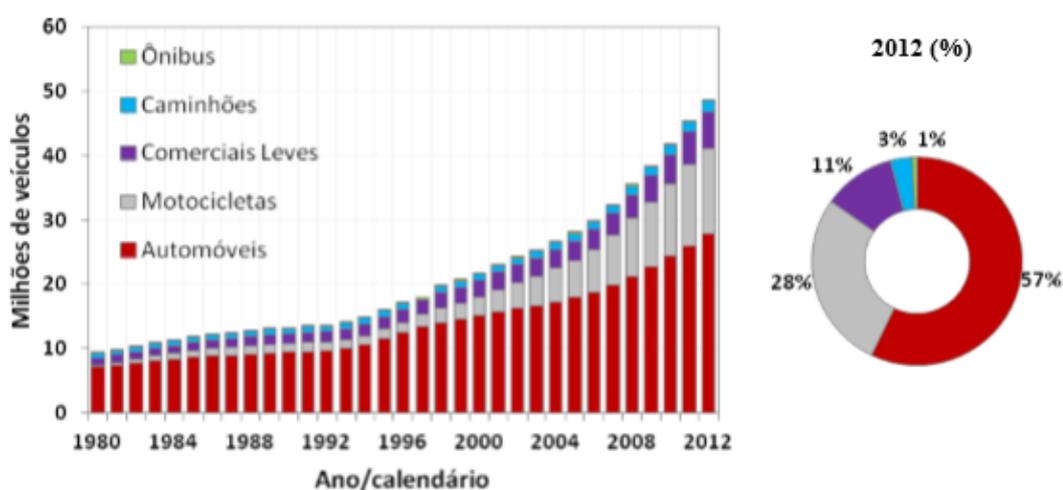
em ponto próximo à via de trânsito intenso e afastado 500 m dela, mostraram que os níveis de NO_x , CO e material particulado sofrem influência do trânsito de veículos, pois exibiu um padrão diário e semanal.

Cooper e Alley (2011) ressaltam que o crescimento de fontes móveis cria mais dificuldade para o controle da poluição atmosférica ao redor do mundo, pois um grande número de fontes pequenas e descentralizadas que se movem são mais difíceis de regular do que fontes fixas estacionárias, em geral essas fontes estão mais próximas da população que vive e trabalha nas cidades e carros têm se tornado um objeto que faz parte do estilo de vida, da cultura das pessoas em vários países ao redor do mundo.

Nas grandes cidades brasileiras, os gases de escapamento dos veículos são a principal causa da ultrapassagem dos padrões de qualidade do ar. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), maior centro urbano do Brasil, apresenta os maiores problemas de poluição atmosférica. Em São Paulo, a frota de veículos em 2013 atingiu 14.808.384 veículos e a contribuição da poluição atmosférica veicular na cidade corresponde a 97% das emissões de CO, 82% de HC, 78% de NO_x , 43% de SO_x e 40% de MP, conforme o último Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo de 2014 (CETESB, 2014a).

No Brasil, a frota de veículos está em constante crescimento desde 1980, atingindo em 2012 o volume de 49 milhões de veículos, com 57% de automóveis e 28% de motocicletas, como pode ser visualizado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Evolução da frota nacional estimada de veículos por categoria



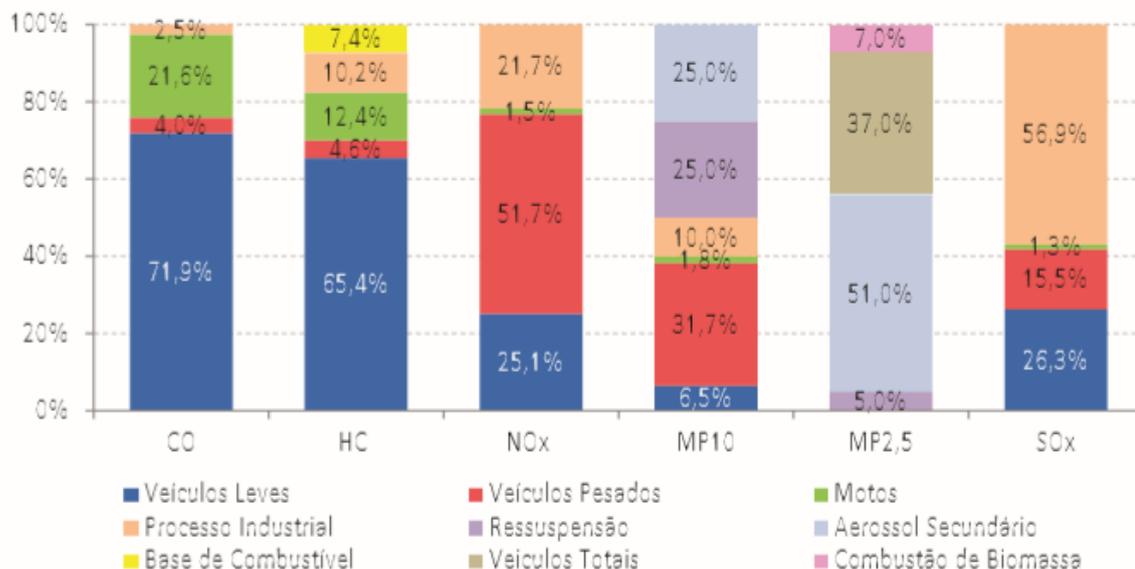
Fonte: Brasil, 2014.

Há várias categorias de veículos e o controle de suas emissões é realizado a partir da classificação dos veículos em leves, movidos a gasolina, álcool ou gás natural e pesados, movidos a diesel. Ambos os tipos de veículos geram gases, vapores e material particulado em diferentes quantidades conforme o tipo. Os veículos leves são representados pelos carros de passeio e utilitários, cujas emissões são provenientes do escape, da evaporação do tanque de combustível e do carburador e do cárter, sendo as do sistema de escapamento as mais significativas. Os veículos pesados compreendem os caminhões e ônibus e o sistema de exaustão é o que mais contribui para a poluição do ar (DERÍSIO, 2012). Macedo (2012) apresenta, além dessas, a categoria de veículos de duas rodas ou semelhantes, que compreenderiam os ciclomotores e similares. Neste estudo, serão utilizadas as definições da resolução CONAMA Nº 18/86:

- Veículo leve: veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar até doze passageiros ou com massa total máxima igual ou inferior a 2800 quilogramas. Compreende veículos de passageiro e utilitários.
- Veículo pesado: veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar mais que doze passageiros ou com massa total máxima superior a 2800 quilogramas. Compreende caminhões, ônibus, micro-ônibus.

No Gráfico 2 pode-se visualizar a contribuição de vários tipos de fonte nas emissões dos poluentes na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Gráfico 2 – Percentuais de emissões de poluentes por tipo de fonte na RMSP em 2014



Fonte: CETESB, 2014a.

Observa-se que as emissões de CO e HC são oriundas em sua maioria pelos veículos leves e que as de NO_x e MP₁₀ pelos veículos pesados. As motocicletas, embora tenha frota menor, participam na emissão de CO e HC significativamente, devido a seus fatores de emissão serem maiores historicamente. Os óxidos de enxofre e as partículas finas são oriundas majoritariamente por processos industriais e aerossóis secundários, respectivamente (CETESB, 2014a).

Segundo a CETESB (2002), a emissão relacionada a veículos pode ser dividida em emissões de subprodutos da combustão lançados pelo tubo de escapamento do veículo; de gases do cárter do motor; de partículas provenientes do desgaste de pneus; de ressuspensão de partículas do solo e emissões evaporativas associadas às operações de transferência de combustível.

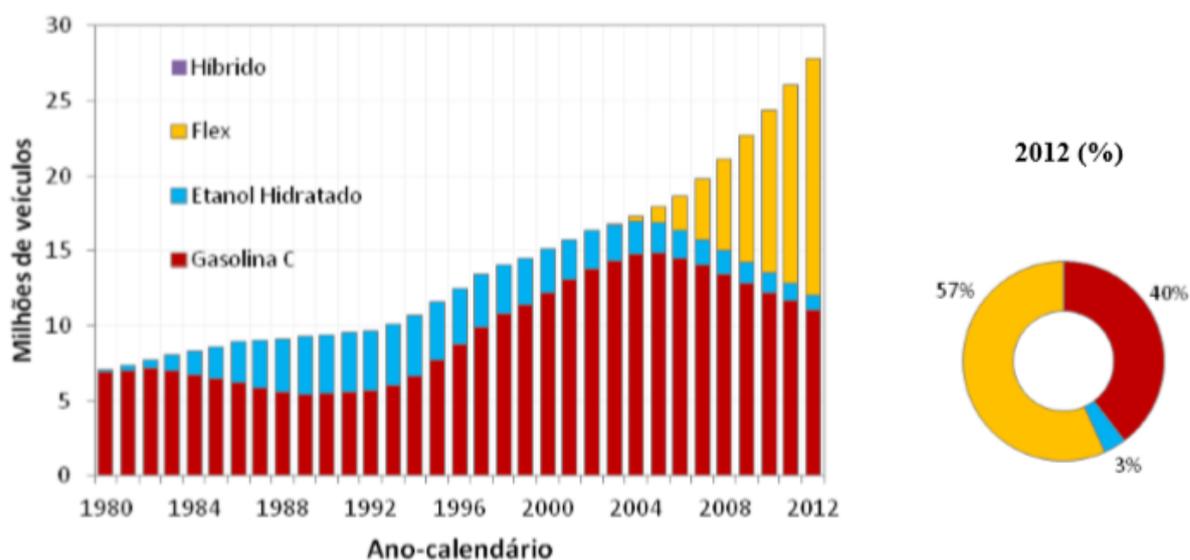
As emissões evaporativas de gasolina ocorrem quando o tanque cheio de veículos estacionado durante a noite esfria e, durante o dia, com o aquecimento, exala vapores de hidrocarbonetos. Em condições de temperaturas elevadas, as emissões de vapores por perdas são significativas, pois o sistema de combustível se aquece durante a movimentação do veículo. Quando os veículos são desligados, ocorre emissões residuais de vapores de combustível (GODISH, 2004).

Segundo Szwarcfiter (2004), há vários fatores que contribuem para a qualidade e quantidade de poluentes emitidos por veículos automotores: o aumento da frota de veículos, que aumenta o volume total de emissões por si próprios e pelo aumento do congestionamento do trânsito, fazendo com que os veículos emitam mais por quilômetro percorrido; a idade do veículo, relacionada à distância percorrida durante a sua vida-útil, o tipo e a frequência de manutenção, o tipo de veículo utilizado, a existência de catalisadores e suas condições de manutenção, todos esses fatores interferem na emissão de poluentes pelos veículos.

A quantidade de poluentes emitidos pelos veículos depende do tipo de combustível utilizado. A gasolina é um combustível produzido pelo refinamento de petróleo e em sua composição há misturas complexas de hidrocarbonetos e aditivos como chumbo, manganês, que vem sendo diminuídos para minimizar danos aos conversores catalíticos e à saúde da população. No entanto, como é um combustível com componentes de alta volatilidade, emissões evaporativas, de abastecimento e de movimentação dos veículos aumentam. As concentrações de HC aromáticos na gasolina aumentam as emissões de CO, HC, benzeno e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (GODISH, 2004).

A CETESB (2014) mostra que na RMSP 44% das emissões de CO advém dos automóveis movidos a gasolina, mesmo a frota de veículos a gasolina sendo menor que a de veículos *flex* (álcool e gasolina) conforme apresenta o Gráfico 3, pois os veículos movidos a gasolina possui idade média maior, fator que contribui significativamente para as maiores emissões.

Gráfico 3 – Evolução da frota nacional estimada de automóveis por tipo de combustível



Fonte: Brasil, 2014.

O etanol (álcool etílico carburante) é um combustível mais limpo, produzido a partir da fermentação de açúcares, mas possui poder calorífico menor que a gasolina, o que não favorece sua utilização, pois a quantidade necessária para funcionamento do motor é maior que a gasolina e o custo por vezes não compensa.

Uma alternativa aplicada em muitos países, assim como no Brasil, é mistura de gasolina com uma porcentagem de álcool para aumentar a pressão de vapor e reforçar a partida do motor em condições climáticas mais frias, em que o uso de álcool como o metanol como combustível em veículos não atendem de forma satisfatória. No Brasil, a combinação da gasolina “A” com álcool anidro, gera a gasolina “C” conhecida e distribuída nos postos de gasolina. (GODISH, 2004; FERNANDES, 2012).

Em 1975, houve no Brasil, a criação do PROÁLCOOL, cujo objetivo era substituir gasolina por álcool combustível, através da intensificação da adição do álcool anidro à gasolina, ou através da substituição da gasolina por álcool hidratado em motores. Na fase inicial do Programa, a produção da cana-de-açúcar aumentou e o álcool se tornou um importante combustível no país com a continuação da adição de álcool anidro à gasolina, a fim de substituir de 20 a 25% da gasolina consumida no Brasil por álcool. Essa medida possibilitou em 1991 a eliminação do uso do chumbo, que servia para aumentar a octanagem do combustível e controlar a ignição (LEMOS, 2010). Nos anos 80, houve o auge do Programa, em que 90% dos automóveis vendidos eram movidos exclusivamente a álcool, no entanto, devido a problemas da safra de cana-de-açúcar, a produção de etanol foi reduzida, caindo a venda de automóveis novos movidos a álcool para 13% em 1990. A porcentagem de adição do álcool à gasolina oscilou bastante também, atualmente correspondendo a 27% (BRASIL, 2015a). No início do PROÁLCOOL, os veículos movidos a álcool emitiam menos poluentes do que os veículos a gasolina, principalmente o CO. Entretanto, o desenvolvimento tecnológico dos veículos à gasolina ocasionou a diminuição da vantagem ao longo do tempo (SZWARCFITER, 2004).

Além do álcool e da gasolina, o Gás Natural Veicular (GNV) ganhou bastante espaço no Brasil. Os veículos que utilizam esse combustível eram movidos a gasolina ou álcool e foram convertidos com kits para a utilização do GNV. A utilização de kits incompletos e não adequados, sem componentes necessários para um funcionamento correto do sistema leva a muitos veículos convertidos poluírem mais que antes quando eram movidos ao combustível original. Para resolver esse problema, foi criada a resolução CONAMA Nº 291/2001 que regulamentou os kits que devem ser utilizados na conversão. No entanto, para assegurar que os

padrões estão sendo cumpridos, é necessária fiscalização e implementação de programas de inspeção e manutenção veicular (SZWARCFITER, 2004).

Em relação ao Diesel, segundo Ghio et al. (2012), os gases de exaustão de sua queima são os componentes mais importantes da poluição atmosférica veicular. A exaustão do diesel contém mais de quarenta poluentes tóxicos, sendo material particulado o maior contribuinte, e é utilizada como indicador da poluição por veículos (EPA, 2002). Uma pesquisa realizada por Gentner et al. (2012) nos Estados Unidos indicou que as emissões de veículos movidos a diesel têm uma capacidade sete vezes maior em formar aerossóis secundários orgânicos em áreas urbanas do que a gasolina.

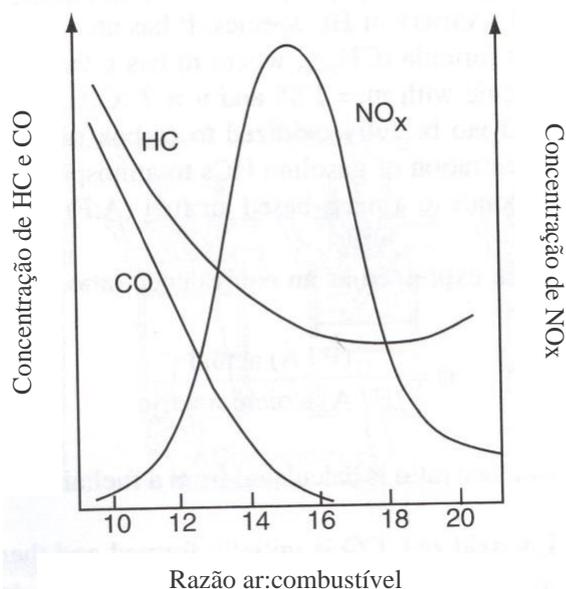
O principal componente que confere ao Diesel esse potencial poluidor é o enxofre, cujo teor no combustível vem sendo reduzido no Brasil ao longo dos anos para diminuição da poluição. A resolução CONAMA Nº 403/2008 aprovou o PROCONVE e suas fases, como a P7 a partir de 2012, que devido ao insucesso da fase anterior P6, continuou o incentivo à redução dos teores de enxofre no diesel e estabeleceu a implantação de tecnologia de remoção catalítica seletiva para remoção de NO_x . Desde 2009, há um esforço do Governo Federal e da iniciativa privada para redução de enxofre, com substituição gradativa do óleo diesel S1800 por S500 e o incentivo ao uso do S10 (teor máximo de enxofre de 10 mg/kg) nas regiões metropolitanas a partir de 2013 (BRASIL, 2009).

Em relação ao motor do automóvel como fonte de poluição, onde a potência é obtida pela transformação de energia química em calor através das reações de combustão, é preciso que a relação ar-combustível recebida por ele seja em proporção estequiométrica (letra grega lambda igual a 1) para evitar mau funcionamento, maior consumo e formação de subprodutos como o CO, como mostra a Figura 3. A proporção de mistura varia conforme o combustível utilizado: álcool a relação é aproximadamente 8,9 gramas de ar para 1 grama de combustível, gasolina 13,8:1 e para o Diesel pode atingir 24:1 (LEMOS, 2010).

A relação estequiométrica proporciona menor geração de CO e HC, pois a combustão é mais completa, enquanto maior geração de NO_x , pois sua formação é favorecida pela temperatura, que durante a combustão é elevada. Quando o motor opera com excesso de ar, com lambda muito maior que 1, as quantidades de CO e HC são muito baixas, no entanto, não é indicado por provocar superaquecimento do motor, perda de potência e queima das válvulas de escape (LEMOS, 2010). A operação em condições de mistura rica também não é muito indicada devido à maior geração de subprodutos pela combustão incompleta do combustível. A situação mais indicada é que o motor opere na faixa de lambdas próximos a 1 com relação

ar/combustível em torno de 16 (Figura 3), em que os níveis de CO e HC continuam baixos e de NO_x são menores, pois nestas condições de excesso de O_2 , a temperatura diminui.

Figura 3 – Relação Ar/Combustível e a concentração de poluentes gerados no processo de combustão em veículos



Fonte: Adaptado de Godish, 2004.

Lemos (2010) destaca que o surgimento do sistema de injeção eletrônica de combustível, responsável pela proporção ar/combustível nos motores do ciclo OTTO, foi um grande avanço para a melhoria do desempenho do veículo, a redução de consumo e da emissão de poluentes, pois um carburador não consegue manter a proporção da mistura ideal, de modo que seja fornecido ao motor somente o volume de combustível que ele necessita. O autor destaca que para que o funcionamento do sistema garanta a eficiência, é necessário um adequado funcionamento do sensor “Sonda Lambda”, que tem a função de medir a quantidade de oxigênio existente na exaustão para que o sistema de injeção seja alimentado com esse dado e corrija a proporção da mistura conforme a necessidade, e do catalisador (ou conversor catalítico), substância que acelera a velocidade de uma reação, tecnologia implantada nos veículos com a finalidade de reduzir as emissões de poluentes produzidos no interior do motor dos automóveis.

O catalisador está presente no sistema de exaustão do veículo, conjunto de tubos que coletam os gases do motor que posteriormente saem pela traseira do veículo, entre o coletor de

gases e o silenciador. É constituído por inúmeros canais, cujas superfícies possuem metais como platina, paládio, ródio, que quando em contato com os gases de escapamento promovem reações, gerando menos subprodutos nocivos ao meio ambiente e à saúde da população. Por meio das reações que formam água, anidrido carbônico e nitrogênio, as emissões de CO, HC e NOx, podem ser reduzidas em até 90% com uma mistura próxima à estequiométrica pelo catalisador (SZWARCFITER, 2004; LEMOS, 2010).

Nesse contexto, muitas medidas de controle que envolvem o mecanismo de funcionamento dos veículos (injeção eletrônica, sensor de oxigênio, conversor catalítico, entre outros dispositivos eletrônicos) já foram feitas, o que se traduziu em diminuições dos níveis de emissão de poluentes por essa fonte. No entanto, o elevado número de veículos em circulação aliado à falta de programas de inspeção veicular e manutenção ineficientes, mantém os automóveis, em conjunto com as indústrias, sendo a maior fonte de poluição nos grandes centros urbanos.

Na cidade de Aracaju, objeto de estudo deste trabalho, a frota de veículos aumentou de 146.486 em dezembro de 2005 para 284.681 veículos até março de 2016, sendo 58,3% de automóveis, 23,8% de ciclomotors, motocicletas e similares, 11,9% de camionetas, caminhonetes e caminhões, 1,3% de ônibus e micro-ônibus e 4,7% das demais categorias (DETRAN-SE, 2016). Diante desse crescimento da quantidade de veículos, a preocupação com a poluição do ar causada por automóveis cresce e a falta de uma rede de monitoramento da qualidade do ar gera a necessidade de estudos que estimem a concentração de poluentes emitidos por esse tipo de fonte e uma análise da qualidade do ar a que a população está exposta.

2.2.1. Poluentes Atmosféricos e Efeitos

Poluente atmosférico é definido pela resolução CONAMA N° 03/90 como:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (BRASIL, 1990).

Os poluentes considerados indicadores da qualidade do ar, por causa da frequência de ocorrência e dos efeitos adversos à saúde e ao ambiente, são monóxido de carbono (CO),

dióxido de enxofre (SO₂), material particulado, ozônio (O₃) e o dióxido de nitrogênio (NO₂) (CETESB, 2014a). Em relação aos veículos automotores, os poluentes emitidos em maior quantidade por veículos leves são monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x) e aldeídos, por veículos pesados são óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) e odor (DERÍSIO, 2012).

Como é um tema amplamente discutido na literatura, são apresentados no Quadro 1 uma breve caracterização de poluentes emitidos pelos veículos e indicadores da qualidade do ar e seus principais efeitos sobre a saúde, ao bem-estar das pessoas e ao meio ambiente.

Quadro 1 – Características principais e efeitos de poluentes indicadores da qualidade do ar

POLUENTE	CARACTERÍSTICAS	EFEITOS AO MEIO AMBIENTE	EFEITOS À SAÚDE*
PTS	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho ≤ 100 µm.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.	-
MP ₁₀	Partículas inaláveis de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc, emitidas por indústrias, automóveis. Faixa de tamanho entre 2,5 e 10 µm.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água	Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.
SO ₂	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO ₃ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas	Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.
CO	Gás incolor, inodoro e insípido, produzido na atmosfera por oxidação do metano (CH ₄) e produto da combustão incompleta de combustíveis e biomassa.	-	Asfixia, agravamento das doenças cardiovasculares, como infarto do miocárdio e insuficiência cardíaca congestiva.
NO ₂	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento de MP ₁₀ na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.	Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma e doença pulmonar obstrutiva crônica.

*Para concentrações elevadas e índice de qualidade do ar N6 – Péssima (>200).

Fonte: Adaptado de CETESB, 2014a; Godish, 2004.

Material Particulado

Material particulado envolve um conjunto de substâncias em suspensão ou dissolvidos no ar é dividido por seu tamanho e potencial de causar problemas de saúde. Além das Partículas Totais em Suspensão (PTS) e partículas inaláveis (MP₁₀) apresentadas no quadro 2, existem as partículas finas (MP_{2,5}), emitidas por queimadas de florestas, indústrias e automóveis, que possuem diâmetro menor ou igual a 2,5 µm (EPA, 2016a). A EPA não regulamenta PTS, por não serem as que mais causam efeitos adversos à saúde. No entanto, o CONAMA regulamenta estas partículas, que serão, portanto, modeladas neste estudo.

Monóxido de Carbono

Os níveis de concentração de CO, produzido quando a mistura está rica e há insuficiência de oxigênio, em áreas urbanas em geral são mais elevados que os valores de referência, pois nessas áreas o setor de transporte é bem desenvolvido e há congestionamentos de trânsito frequentes. Elevadas concentrações ocorrem durante o dia e início da noite ao longo de vias arteriais com fluxo intenso de veículos e decrescem com a distância às vias (GODISH, 2004).

Óxidos de Nitrogênio

Nitrogênio é o elemento mais abundante na atmosfera e está presente em inúmeros compostos, como ácidos (HNO₃), compostos reduzidos (NH₃), espécies iônicas (NO₂⁻, NO₃⁻) e óxidos (N₂O, NO, NO₂), que por se converterem rapidamente entre si, são expressos por NO_x. Dentre eles, os que mais são objetos de estudo ambiental são o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). O NO é um gás relativamente não tóxico, produzido naturalmente pelos processos de nitrificação e desnitrificação no solo, queima de biomassa, oxidação de NH₃ e por atividades antrópicas em altas temperaturas como combustão de veículos movidos a gasolina e a diesel, geração de energia elétrica por combustível fóssil e fornos industriais. Ele no ar está presente em maiores concentrações no início da manhã e logo converte-se em NO₂, cujos picos de concentração ocorrem na metade do dia (GODISH, 2004).

Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos não foram apresentados no quadro por não serem legislados nacionalmente. No entanto, são um dos poluentes mais emitidos pelos veículos e incluem uma série de substâncias compostas por hidrogênio e carbono. Dentre elas, estão os aromáticos (ligação tripla ou mais), cuja estrutura básica é o anel benzênico (C₆H₆) que formam o grupo BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), utilizado como aditivo da gasolina para o aumento da octanagem nos veículos. Neste grupo, estão presentes os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), produzidos na combustão de combustíveis e materiais,

encontrados em aerossóis na forma de fração de carbono elementar e potenciais causadores de câncer (GODISH, 2004).

Os efeitos adversos dos poluentes apresentados sobre o meio ambiente e a saúde das pessoas são semelhantes e incluem danos à vegetação, com supressão de poros das folhas, redução de visibilidade com as névoas formadas, corrosão de materiais, formação de chuva ácida, doenças respiratórias e circulatórias que em estágios mais graves podem levar a infartos e até a morte.

2.2.2. Saúde e Exposição da população

A relação entre a poluição urbana oriunda de veículos automotivos e a saúde das pessoas é alvo de inúmeros estudos nos últimos anos.

Su et al. (2015) avaliaram a exposição da população de sete cidades ao ar poluído devido ao tráfego de veículos. A partir de estimativas de porções da população potencialmente expostas nas cidades globais e dados de distribuição da população e trânsito nas rodovias, foi observado que as cidades da América do Norte (Los Angeles, Toronto) possuem menor potencial de exposição em relação às europeias (Barcelona, Paris), que possuem maior número de rodovias e aglomerados populacionais próximos a elas, e que em todas as cidades houve correlação entre a exposição da população com a densidade de rodovias nas cidades, ou seja, quanto maior a malha rodoviária, maiores são as porções da população expostas à poluição. Os pesquisadores concluíram que é preciso um entendimento adequado da configuração urbana, com ordenação do território para a realização de medidas para proteção da saúde pública.

Olamo et al. (2015) usaram um modelo de regressão do uso do solo para caracterizar a distribuição espacial de NO₂ e BTEX (benzeno, tolueno, etileno e xilenos) na cidade de Ottawa em Ontario, Canadá. Os autores encontraram que as distribuições espaciais destes poluentes são influenciadas pela densidade da rede rodoviária e por rodovias, concentrando-se nessas áreas. Concluíram também que considerar as interseções entre as rodovias é importante para avaliar o aumento das emissões associados ao trânsito, sendo uma alternativa para os casos que dados de tráfego não são disponíveis.

Costa et al. (2015) sugeriram que doenças neurológicas degenerativas e comportamentais, como autismo e demência, possuem relação com exposição a altas

concentrações de poluentes no ar. Acrescentam que exposição de curta duração podem causar alterações bioquímicas associadas a essas doenças.

Bertin et al. (2015) investigaram a associação entre a poluição atmosférica veicular e nascimentos prematuros em áreas urbanas e rurais na França. Utilizaram dados do censo francês para classificar as residências das mulheres grávidas, estimaram as concentrações de NO₂ nas residências com modelos de regressão de uso do solo como indicador de poluição do ar por tráfego de veículos e associaram os dois parâmetros com modelos logísticos de regressão. Os resultados dos estudos foram semelhantes a outros obtidos previamente, conforme os autores, e indicaram que altas concentrações do poluente incrementam o risco de nascimento prematuro para mulheres que residem na zona urbana, o que não ocorreu para os ambientes rurais.

Um estudo recente, de Girguis et al. (2016), em Massachusetts estimou, entre 2001 e 2008, associações entre problemas cardíacos, faciais e neurológicos de fetos e exposição das mães à poluição do ar por material particulado fino (MP_{2,5}) relacionada ao tráfego. Os autores apresentaram que problemas de lábio leporino em bebês tinham relação inversão com a exposição a MP_{2,5}, mas defeitos no septo e na cavidade dos átrios do coração e insuficiência de válvula aórtica foram associados positivamente com a densidade do tráfego, o que reforça a preocupação com o controle da poluição atmosférica veicular.

2.3. Legislação

Neste capítulo será apresentada uma compilação das principais legislações e suas disposições pertinentes ao controle da Poluição Atmosférica, em especial a Poluição Atmosférica Veicular.

2.3.1. Nacional

No Brasil, as legislações ambientais a nível federal são regulamentadas e dispostas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, o CONAMA. A nível estadual e municipal, cabe aos órgãos ambientais o estabelecimento de padrões ambientais, embasados na legislação federal. No Quadro 2 são apresentadas as principais resoluções CONAMA, decretos e leis estaduais e municipais relacionados à qualidade do ar e poluição atmosférica veicular.

Quadro 2 – Aparato legal nacional aplicado à qualidade e poluição do ar

NÍVEL	LEGISLAÇÃO	DESCRIÇÃO
FEDERAL	Res. CONAMA Nº 18 de 06 de maio de 1986	Institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE e estabelece limites máximos de emissão para veículos automotivos dos ciclos Otto e Diesel.
	Res. CONAMA Nº 05 de 15 de junho de 1989	Institui o PROGRAMA NACIONAL DE QUALIDADE DO AR – PRONAR, estabelece padrões de qualidade e enquadra o território nacional em classes.
	Res. CONAMA Nº 03 de 28 de junho de 1990	Estabelece Padrões de Qualidade do Ar, Níveis de Alerta, Atenção e Emergência e Métodos de Amostragem dos poluentes.
	Res. CONAMA Nº 08 de 06 de dezembro de 1990	<i>Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição.</i>
	Res. CONAMA Nº 297 de 26 de fevereiro de 2002	<i>Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos.</i>
	Res. CONAMA Nº 315 de 29 de outubro de 2002	Institui novas etapas para o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE, em caráter nacional.
	Res. CONAMA Nº 382 de 26 de dezembro de 2006	<i>Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.</i>
	Res. CONAMA Nº 418 de 28 de junho de 2009	<i>Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - IM pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso.</i>
	Res. CONAMA Nº 415 de 24 de setembro de 2009	<i>Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências.</i>
	Res. CONAMA Nº 432 de 13 de julho de 2011	<i>Estabelece novas fases de controle de emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, e dá outras providências.</i>
	Res. CONAMA Nº 456 de 29 de abril de 2013	<i>Corrige a Tabela I do Anexo da Resolução Conama n. 432, de 13 de julho de 2011.</i>
Res. DENATRAN nº 452 de 26 de setembro de 2013	<i>Dispõe sobre os procedimentos a serem adotados pelas autoridades de trânsito e seus agentes na fiscalização das emissões de gases de escapamento de veículos automotores de que trata o artigo 231, inciso III, do Código de Trânsito Brasileiro (CTB).</i>	
ESTADUAL	Lei nº 5.858 de 22 de março de 2006 - Sergipe	<i>Dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente, institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente, e dá providências correlatas.</i>
	Res. CEMA nº 21 de 28 de junho de 2011 - Sergipe	<i>Dispõe sobre a criação do Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado de Sergipe – PCPV.</i>

O primeiro instrumento jurídico federal para controle da poluição atmosférica de forma geral em ambiente externo foi a Resolução CONAMA Nº 05/89. Esta resolução criou o Programa Nacional de Qualidade do Ar – PRONAR, instrumento básico da gestão da qualidade do ar no país para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica.

Dentre as estratégias dispostas nessa resolução estão a realização de um Inventário Nacional de Fontes e Poluentes do Ar e ações de curto, médio e longo prazos para a implementação do Programa, cujo gerenciamento compete ao IBAMA.

No ano seguinte, foi criada a Resolução CONAMA N° 03/90, que estabeleceu padrões primário e secundário de qualidade do ar, níveis de atenção, alerta e emergência. Padrões primários, segundo a resolução, são as concentrações de poluentes que acima delas a saúde da população é afetada. Os padrões secundários são as concentrações, abaixo das quais, se prever mínimos danos aos materiais, ao meio ambiente e efeitos adversos ao bem-estar da população. A Tabela 1 mostra os padrões estabelecidos por essa resolução para cada poluente e período de tempo, que serão os utilizados neste trabalho para a avaliação da qualidade do ar pelas estimativas de concentração pelo modelo AERMOD.

Tabela 1 – Padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 03/90

PARÂMETRO	PADRÕES DA QUALIDADE DO AR	
	PRIMÁRIO (Saúde Humana)	SECUNDÁRIO (Bem-estar da população e outros efeitos)
PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Média geométrica anual	80	60
Média de 24 horas (*)	240	150
MONÓXIDO DE CARBONO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Média de 8 horas (*)	10.000	10.000
Média de 1 hora (*)	40.000	40.000
DIÓXIDO DE NITROGÊNIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Média geométrica anual	100	100
Média de 1 hora (*)	320	190

Fonte: BRASIL, 1990.

(*) Que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Antes da Resolução que instituiu o PRONAR, o IBAMA, considerando que os veículos automotores dos ciclos Otto e Diesel são fontes relevantes de emissão poluentes, criou a resolução CONAMA N° 18/86, que institui o PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores e estabelece limites de emissão de poluentes para os veículos, com prazos para cumprimento. O Art. I da Resolução, apresenta os objetivos do Programa:

- Reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, visando o atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar, especialmente nos centros urbanos;

- Promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automobilística, como também em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes;
- Criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso;
- Promover a conscientização da população com relação à questão da poluição do ar por veículos automotores;
- Estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados;
- Promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos, postos à disposição da frota nacional de veículos automotores, visando a redução de emissões poluidoras à atmosfera.

O PROCONVE determina os limites máximos de emissão em ensaios padronizados e com combustíveis de referência que os veículos novos devem atender, recolhe e exige a reparação de veículos ou motores cuja produção ou projeto estejam em desconformidade e proíbe que modelos de veículos não homologados sejam comercializados.

Nos anos de 1995, 1998 e 2002, outras resoluções reestabeleceram os valores dos limites de emissão e fases com prazos de cumprimento, como a Nº 315/2002 que estabeleceu limites para duas categorias de veículo leves: de passageiro (abaixo de 1700kg) e comerciais (acima de 1700kg), veículos pesados e inclusão de veículos a gás natural. Para os veículos leves, foram estabelecidas as fases L-4 (a partir de 01 de janeiro de 2007) e L-5 (a partir de 01 de janeiro de 2009), para os veículos pesados as fases P-5 (a partir de 01 de janeiro de 2006) e P-6 (a partir de 01 de janeiro de 2009), que objetivavam principalmente a redução de emissões de MP, NO_x e HC. Houve acréscimo de novos poluentes, hidrocarbonetos não metanos e óxidos de nitrogênio para os motores dos ciclos OTTO e Diesel.

Em 2009, a Resolução CONAMA Nº 415 estabeleceu a fase atual do Programa para veículos leves, a fase L-6 que reduziu os limites de emissão de 2 g/km para 1,3 g/km de monóxido de carbono, de 0,05 g/km para 0,025 g/km de material particulado, dentre outras reduções, para veículos leves novos do ciclo Diesel a partir de 01 de janeiro de 2013 e os do ciclo OTTO a partir de 2014.

Para o controle da poluição por ciclomotores, motocicletas e similares, foi criado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Ciclomotores, Motocicletas e Similares – PROMOT, por meio da resolução CONAMA Nº 297/2002. Os limites estabelecidos nesta resolução foram revistos em outras resoluções, como a CONAMA Nº 342/2003, Nº 432/2011

que estabelece novas fases de emissões e muda categorias de cilindradas para velocidade máxima abaixo e acima de 130 km/h, e N° 456/2013, que atualiza os valores de emissão para todos os modelos de motocicletas a partir de 01 de janeiro de 2016.

Com o objetivo de estabelecer normas de gestão e controle da poluição e do consumo de combustíveis, a Res. CONAMA N° 418/2009 estabelece critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular – PCPV, instrumento de gestão do PRONAR e do PROCONVE, e a implementação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso – I/M pelos órgãos ambientais do município (com frota superior a três milhões de veículos) e do estado, no prazo de 12 meses a partir da data de publicação da resolução.

Em Sergipe, o Conselho Estadual do Meio Ambiente – CEMA criou a Resolução N° 21/2011 que dispõe sobre a criação do PCPV do Estado, em cumprimento à Res. CONAMA N° 418/2009 e consideração ao fato de que as emissões de poluentes na atmosfera estão se expandindo de forma vertiginosa ante ao crescimento populacional. O PCPV do Estado de Sergipe “*tem como base estatística o I Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (Relatório Final), bem como os dados da frota de veículos automotores nos anos de 1980 a 2011 do Estado de Sergipe fornecido pelo Departamento de Trânsito do Estado – DETRAN*” (Artigo 3°) e deve apresentar a necessidade ou não da elaboração de um I/M. Segundo notícia do portal Lagartense, o PCPV de Sergipe foi aprovado pelo CEMA e previa implantação de programa de inspeção veicular até 2013, se houvessem dados da qualidade do ar, estruturação de bancos de dados sobre a frota, análise econômica de emissões (LAGARTENSE, 2011). No entanto, até 2016 não houve um I/M implantado.

Em nível estadual, o estado de São Paulo é precursor no aspecto legal sobre o meio ambiente, através da CETESB que desenvolve e aprimora instrumentos de gestão ambiental, como legislações, programas, redes de monitoramento da qualidade das águas e do ar. Anteriormente à Resolução federal que criou o PRONAR em 1986, São Paulo publicou o Decreto N° 8468 em 1976, que aprova o regulamento da lei N° 997 que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente em todos os seus atributos, como o ar. Em sua seção I do capítulo II da Poluição do Ar, o decreto estabelece os padrões de qualidade do ar, que em geral são similares aos da CONAMA N° 03/90, para dióxido de enxofre, monóxido de carbono e partículas totais em suspensão.

Após essa legislação, outras foram criadas para melhorar os níveis de poluição no estado, em especial no município de São Paulo, grande metrópole do Brasil, que possui a maior frota de veículos no país, uma das maiores fontes de poluição do ar na cidade. Para aumentar o

nível de qualidade de vida da população com a melhoria da fluidez viária, através do Decreto Nº 37085/97, foi criado o "Programa de Restrição ao Trânsito de Veículos Automotores no Município de São Paulo", que segundo o artigo 2º, “*objetiva a melhoria das condições do trânsito, por meio da redução do número de veículos em circulação nas vias públicas, com base no dígito final da placa de licenciamento*”.

O decreto Nº 59113/2013 estabeleceu novos padrões de emissão com cumprimento por metas intermediárias até atingir os padrões finais, apresentando padrões para outros poluentes como partículas finas (MP_{2,5}) e chumbo e segue limites mais restritivos para alguns poluentes, como o ozônio, com respaldo à legislação internacional. Essa legislação estabeleceu também o Índice de Qualidade do Ar, que relaciona os padrões e níveis de atenção, alerta e emergência para os poluentes com níveis de qualidade de cores diferentes que indicam qualidade do ar Péssima (roxo) à Boa (verde). Para cada nível de qualidade, há um significado dos efeitos dos níveis de poluição respectivos sobre a população. Este índice é um útil instrumento de gestão pois facilita a informação para a população sobre os níveis de poluição a que ela está exposta. Abaixo na Tabela 2, são apresentados valores para alguns poluentes, estabelecidos pela CETESB por este decreto.

Tabela 2 – Índice de Qualidade do Ar – CETESB para alguns poluentes.

QUALIDADE	ÍNDICE	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	SO ₂ (µg/m ³) 24h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h
N1-BOA	0 - 40	0 - 50	0 - 20	0 - 9	0 - 200
N3-MODERADA	41 - 80	>50 - 100	>20 - 40	>9 - 11	>200 - 240
N4-RUIM	81 - 120	>100 - 150	>40 - 365	>11 - 13	>240 - 320
N5-MUITO RUIM	121 - 200	>150 - 250	>365 - 800	>13 - 15	>320 - 1130
N5-PÉSSIMA	>200	>250	>800	>15	>1130

Fonte: Adaptado de CETESB, 2014a.

Em Sergipe, há a Política Estadual do Meio Ambiente (Lei nº 5.858/2006), que em seu art. 14º, inciso II, dispõe sobre a racionalização do uso dos atributos ambientais, incluindo o ar,

mas não possui legislação específica que estabeleça padrões de emissões, sendo utilizados os da CONAMA Nº 03/90 para os processos de licenciamento e gestão ambiental no estado.

2.3.2. Internacional

Em nível internacional, o aparato legal que regulamenta os padrões de qualidade do ar e de emissões de poluentes pelas diversas fontes antecede o do Brasil, devido à necessidade de controlar os níveis de poluição existentes na Europa, nos Estados Unidos, que provocaram episódios críticos afetando à saúde da população e à preservação do meio ambiente. Ressalta-se que as regulamentações das agências ambientais internacionais são a base para as normas e resoluções brasileiras e suas políticas são exemplos eficazes de gestão da qualidade do ar.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) define diretrizes gerais para a condução de políticas públicas sobre a saúde e através de *guidelines* (guias), elaborados por grupo de especialistas de diversas áreas, incluindo especialistas em toxicologia, epidemiologia e gestão da qualidade do ar, publica recomendações quanto às concentrações de poluentes que afetam a saúde no ambiente e são revisados continuamente (SANTANA et al., 2012).

Nos Estados Unidos, em 1970, foi criada a Agência de Proteção Ambiental Americana, a EPA, que define os padrões de qualidade do ar naquele país, assim como elabora estudos, coleta e fornece dados de poluição do ar, faz acompanhamento das políticas estaduais e define diretrizes de gestão da qualidade do ar (EPA, 2016b). Sua atuação foi reforçada com a aprovação da Política Nacional de Ar Limpo, o “*Clean Air Act*” (CAA), que iniciou o controle da poluição do ar nos EUA em 1970, com revisões significativas em 1977 e 1990. Em relação às fontes móveis, a EPA ao longo dos anos exigiu reduções drásticas das emissões de motores novos de veículos e máquinas. Novos carros, picapes, caminhonetes estão 99% mais limpos quanto às emissões de HCs, CO, NO_x e MP em comparação com os veículos nos anos 70. Enxofre na gasolina foi reduzido 90% e no diesel em torno de 99%. (SANTANA et al., 2012; EPA, 2016c).

A União Europeia possui um sistema de gestão da qualidade do ar que é regido pela Diretiva 2008/50/EC, elaborada pela Comissão Europeia (EC). Essa diretiva estabelece padrões que correspondem ao limite para um poluente de modo que efeitos prejudiciais à saúde humana e ao ambiente sejam evitadas ou reduzidas e diferentemente da EPA, OMS e do CONAMA, regulamenta padrões para metais, como arsênio, cádmio, níquel e para hidrocarbonetos, como o benzeno e os policíclicos aromáticos. Entre 2011 e 2013, a EC fez uma revisão de sua política

de qualidade do ar que propôs em 2013 um Pacote de Política de Qualidade do Ar e para sua divulgação e informação foi criado o “*Cleaner air for all*”, infográficos que apresentam as fontes de poluição, os principais poluentes e as previsões de benefícios com a política, como diminuição das mortes prematuras de 430.000 para 224.000 até 2030 (SANTANA et al., 2012; EC, 2016b; EC, 2016c).

2.4. Dispersão de Poluentes Atmosféricos

Os poluentes emitidos no ar sofrem um processo de dispersão, que consiste no transporte e na movimentação de suas moléculas no ar, e ao longo do tempo e do espaço tendem a diluir na atmosfera. Segundo Moraes et al. (2010) apud Rosa (2012), a dispersão de poluentes na atmosfera resulta dos fenômenos da advecção e difusão. O fenômeno da advecção é o que leva o poluente de um ponto para outro sob ação da velocidade média do vento, ocorrendo na horizontal e em toda a atmosfera, e a difusão compreende a forma que o poluente se dispersa na atmosfera na dimensão vertical.

A dispersão atmosférica é influenciada por diversos fatores: meteorológicos, como vento, turbulência, temperatura, estabilidade atmosférica, das fontes de emissão (altura de lançamento, diâmetro, velocidade e temperatura de saída de gases, taxa de emissão dos poluentes), da topografia, como o albedo e a rugosidade da superfície.

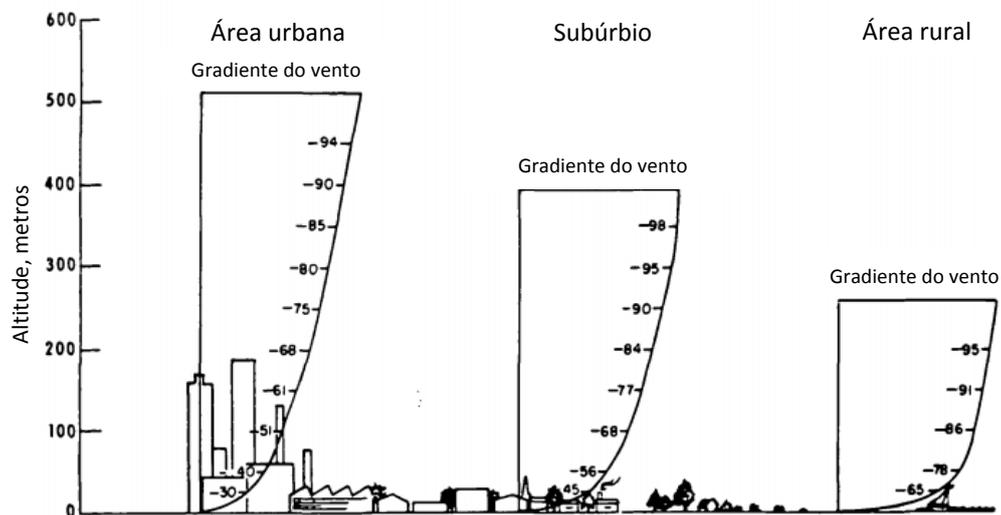
A seguir, são descritos os principais parâmetros que influenciam esse fenômeno de dispersão de poluentes no ar.

2.4.1. Vento e Turbulência

Vento é a descrição da movimentação horizontal do ar, resultante das diferenças de pressão do ar, que são causadas pelas diferentes temperaturas na superfície terrestre. O ar movimenta-se da região de maior pressão para a de menor e a direção de seu fluxo depende além das forças de pressão, do efeito Coriolis e de fricção com a superfície. O efeito Coriolis corresponde ao efeito da rotação da Terra sobre o vento, que não se move apenas perpendicularmente através das linhas isobáricas, ele sofre uma deflexão para leste no hemisfério norte e para oeste em torno da linha do Equador, que é mais forte em altas latitudes e quando a velocidade do vento é alta. (GODISH, 2004).

O vento, cuja caracterização concentra-se na sua direção e velocidade, depende tanto das condições meteorológicas como as topográficas. Sua velocidade horizontal é afetada pela presença de obstáculos e pela fricção ocasionada pela rugosidade da superfície da terra, que varia conforme a topografia, ou seja, vales, rios, campos, montanhas possuem rugosidades diferentes, portanto provocam velocidades de vento diferentes (KAWANO, 2003). Assim, a fricção que é máxima próximo à superfície reduz a velocidade do vento, consequentemente a deflexão causada pelo efeito Coriolis e se reduz à medida que a altitude aumenta (GODISH, 2004). Esse efeito da rugosidade da superfície e o da variação da altitude podem ser vistos na Figura 4.

Figura 4 – Variação do vento com a altitude e a rugosidade da superfície



Fonte: Adaptado de Turner, 1970.

Além do efeito da diferença de rugosidade entre as superfícies de áreas urbanas e rurais sobre o perfil vertical do vento, como é observado na Figura 4, a velocidade do vento varia com a altitude exponencialmente, cuja relação pode ser obtida pela Equação 1 de Turner (1994) apud Kawano (2003), descrita abaixo. Quanto maior a altitude, maior será a velocidade do vento em geral, pois menor é o efeito de fricção.

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^p \quad (1)$$

Onde:

u_1 é a velocidade do vento medida na altura z_1 (m/s);

u_2 é a velocidade do vento corrigida na altura z_2 (m/s);

z_1 é a altura onde foi medida a velocidade do vento (m);

z_2 é a altura de referência, que normalmente é 10m;

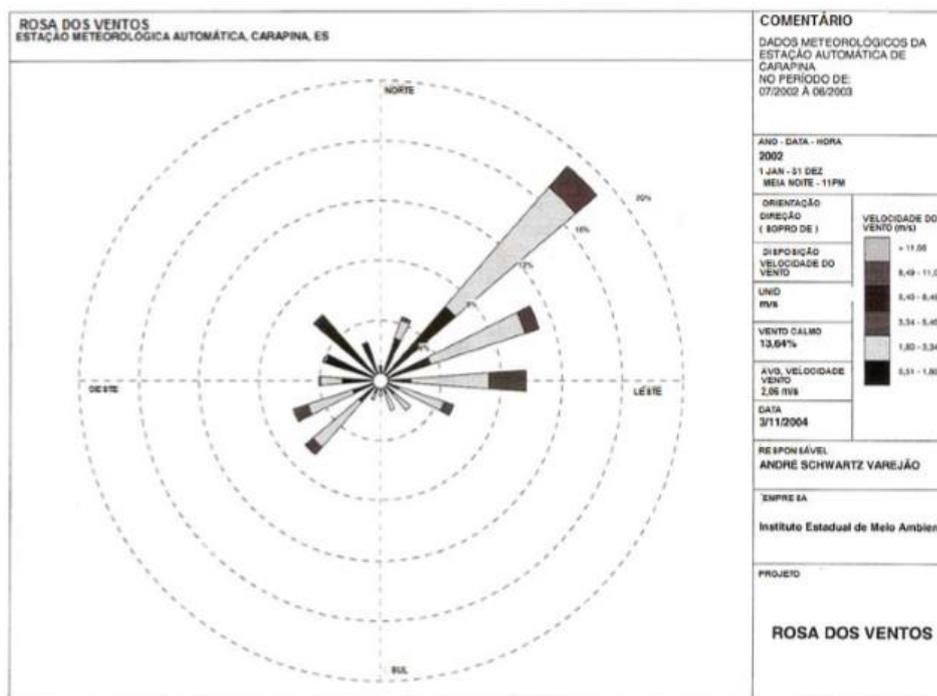
p é o expoente que depende da classe de estabilidade atmosférica e do local, podendo variar de 0,07 para condições instáveis a 0,55 para condições estáveis.

A partir da Figura 4, também pode-se observar a altura máxima de cada perfil de vento, em que os efeitos da superfície acabam e os efeitos da força Coriolis e da diferença de pressão começam. Para áreas urbanas a influência da superfície estende-se até uma altitude maior, em torno de 500m, do que na área rural (~250 m) (GODISH, 2004).

A dispersão atmosférica é afetada também pela variação da direção do vento, logo seu conhecimento é crucial para a predição e interpretação das curvas de distribuição de concentração de poluentes.

O conhecimento da frequência da direção do vento e sua velocidade em um período do tempo, pode-se obtido pelas rosas dos ventos. A rosa do vento é uma representação gráfica que indica a direção de onde e para onde o vento sopra, sendo o vento denominado pela posição de onde ele sopra, por exemplo, um vento sul sopra do sul para o norte. Na Figura 5, é apresentada uma rosa dos ventos da cidade de Vitória-ES, obtida com os dados da Estação de Carapina, que indica que os ventos predominantes são nordestes, pois sopram do nordeste para o sudoeste.

Figura 5 – Rosa dos Ventos de Vitória-ES para o período de 2002 a 2003



Fonte: Santos, Varejão e Silva, 2011.

Outro fator que contribui para a dispersão é a turbulência, que de acordo com a NBR 8969/85 é o movimento do vento de forma irregular, com alterações de velocidade e direção rápidas, acompanhado de correntes ascendentes e descendentes.

Segundo Godish (2004), a turbulência é característica de dias ensolarados e há duas forças de formação de vórtices turbulentos:

- **Térmica:** variação de densidade de massas gasosas pela variação de temperatura na superfície em função da radiação solar incidente. Esta diferença faz com que massas gasosas de menores densidades ascendam e as de maiores densidades descendam provocando movimentos verticais;
- **Mecânica:** fricção ocorrida pelo contato entre o vento, as estruturas e a vegetação. Essa turbulência aumenta com a velocidade do vento e a rugosidade da superfície.

A influência da turbulência para a dispersão de poluentes é positiva, pois promove a mistura dos poluentes na massa de ar, conseqüentemente a concentração de poluentes diminui (GODISH, 2004).

2.4.2. Temperatura e Albedo

A atmosfera é controlada pela energia que vem do sol que aquece o planeta. Este aquecimento depende da radiação incidente e da insolação. A radiação incidente são as ondas eletromagnéticas recebidas num local num período específico e depende da transparência da atmosfera, duração da luz solar e constante solar. Ela é parte absorvida por substâncias, vegetação, seres vivos e pela superfície e parte refletida para fora da Terra, denominada de albedo. As superfícies mais claras possuem maiores albedos (0,5 a 0,8), ou seja, maior capacidade de refletir a radiação incidente, ao contrário das superfícies cobertas por vegetação, da água que possuem menores albedos, em torno de 0,02 a 0,05 (BOUBEL et al., 2004 apud MACEDO, 2012).

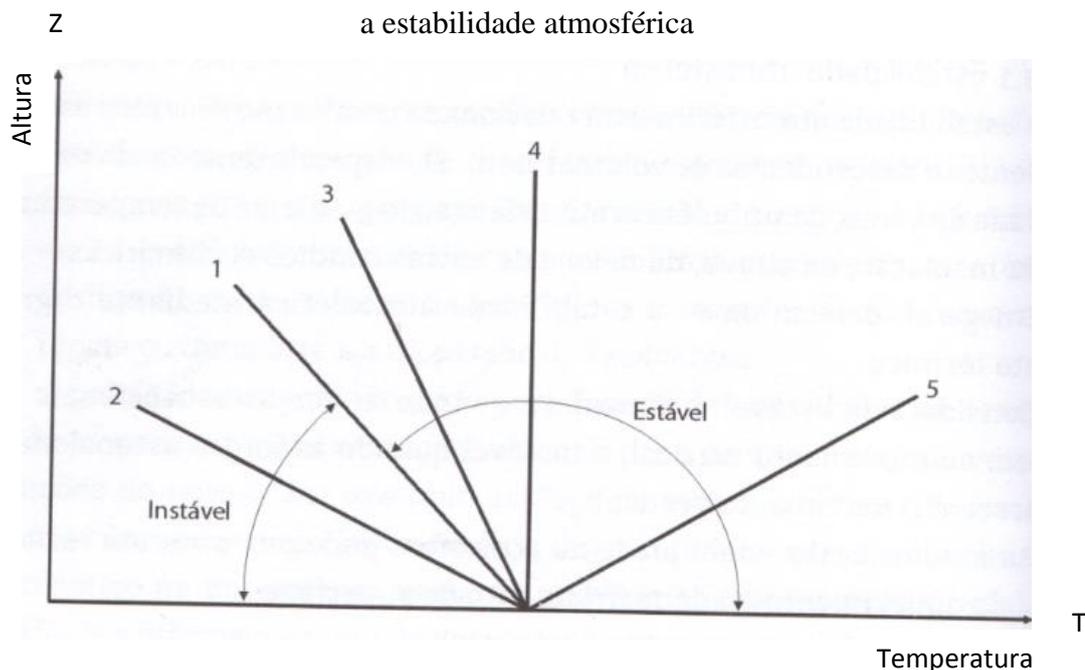
A radiação solar contribui para formação de poluentes secundários, como o ozônio e a variação de sua reflexão devido às diferenças de albedo entre as superfícies provoca diferentes gradientes de temperatura e conseqüentemente influencia na dispersão de poluentes (ROSA, 2012; BARBON, 2008).

A temperatura e a pressão também influenciam na movimentação das massas de ar. Nas camadas atmosféricas, a pressão sempre diminui com a altitude, a temperatura diminui na troposfera, na mesosfera aumenta e depois volta a diminuir nas camadas superiores (EPA, 2004). A diferença de pressão e temperatura promove a ascensão do ar quente enquanto o ar frio desce, desencadeando uma movimentação vertical do ar.

2.4.3. Estabilidade atmosférica

A estabilidade atmosférica corresponde ao grau de resistência da atmosfera aos movimentos verticais de massas de ar que influenciam na dispersão de poluentes. Segundo Moraes (2004), pode-se definir estabilidade atmosférica como a capacidade da atmosfera em resistir ou intensificar os movimentos verticais. A estabilidade pode ser avaliada pelo gradiente de temperatura em função da altitude, cuja taxa de mudança da temperatura denomina-se taxa de declínio (*lapse rate*) (MORAES, 2004 e GODISH, 2004). A Figura 6 apresenta a relação entre a estabilidade atmosférica e as taxas de declínio.

Figura 6 – Perfil de temperatura em função da altitude para relacionar a taxa de declínio com



Fonte: Adaptado de Derísio, 2012.

A linha 1 representa o gradiente adiabático de temperatura, em que a temperatura diminui 1 °C a cada 100 m de altitude e que um volume de ar mantém a mesma temperatura que a vizinhança quando um movimento vertical é exercido sobre ele (DERÍSIO, 2012). A linha 2 representa condições instáveis, em que a temperatura diminui com a altitude a uma taxa maior que na linha 3 e a dispersão é favorecida pois ocorre na presença de radiação solar mais forte, ventos suaves e fortes movimentos verticais do ar. A linha 3 está próxima da taxa de declínio adiabática (neutra) e apresenta uma leve diminuição da temperatura com o aumento da altitude, pois há baixo aquecimento e o ar frio se expande e sua pressão diminui. Situação que ocorre em condições nebulosas (menor incidência da radiação solar), ventos intensos, próximas ao nascer e pôr-do-sol, em que a dispersão é boa. A linha 4 corresponde à não variação da temperatura com a altitude, situação em que a dispersão é limitada, pois não há gradiente de temperatura que promova turbulência do ar, o que faz que a pluma ascenda lentamente (GODISH, 2004).

A linha 5 é característica de atmosfera em condições muito estáveis, principalmente no período noturno com ventos calmos, em que ocorre o processo de inversão térmica (temperatura aumenta com a altitude), o que reduz a movimentação vertical do ar, prejudicando a dispersão de poluentes (GODISH, 2004). Segundo Barbon (2008), o fenômeno de inversão térmica ocorre quando o gradiente negativo da temperatura em relação à altitude é rompido e

condições estáveis da atmosfera inibem a circulação vertical e a dispersão de poluentes, conseqüentemente.

A inversão térmica pode ser por subsidência e radiação. Por radiação é a inversão devido ao resfriamento do solo durante a noite e por subsidência é a que ocorre pelo afundamento de massas de ar e conseqüente compressão da atmosfera e aquecimento (DERÍSIO, 2012). Em período noturno, portanto, a dispersão atmosférica de poluentes é desfavorecida pelo efeito da inversão térmica, que é uma condição meteorológica, em que massas de ar quente retêm massas de ar frio próximo à superfície, impedindo a movimentação na direção vertical dos poluentes, que devido à baixa velocidade dos ventos horizontais, concentram-se próximos à superfície (ROSA, 2012).

A classificação da atmosfera quanto à sua estabilidade não é simples, em virtude da dificuldade de determinar a turbulência do ar. Dentre vários esquemas de classificação, há um critério amplamente utilizado, baseado em observações meteorológicas da velocidade do vento e insolação no período noturno, cobertura de nuvens no céu: classes de estabilidade de Pasquill-Gifford. As classes vão de A (fortemente instável) à F (estável), constituindo seis classes de estabilidade, conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Classes da Estabilidade Atmosférica por Pasquill-Gifford

CLASSES	ESTABILIDADE
A	Fortemente instável
B	Instável
C	Fracamente instável
D	Neutra
E	Fracamente estável
F	Estável

Fonte: Adaptada de Rosa, 2012.

Synodinou e Kambezidis (1998) relatam que Turner em 1964 complementou o método de Pasquill incluindo a relação das classes com o ângulo de incidência solar e sua intensidade durante o dia, a porcentagem de cobertura de nuvens durante a noite e a velocidade do vento a 10m de altitude, constituindo um critério Pasquill-Gifford-Turner (PGT), que foi revisado por diversos autores em seguida e considerado a base padrão de classificação. Esta classificação é apresentada na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Classificação da Atmosfera quanto à estabilidade por Pasquill-Gifford-Turner

Velocidade do Vento a 10m de altitude (m/s)	Dia			Noite	
	Radiação solar incidente			Levemente nublado ($\geq 4/8$ baixas nuvens)	Pouco nublado ($\leq 3/8$ cobertura nuvens)
	Forte	Moderada	Fraca		
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fonte: Adaptado de Woodward, 1998.

Observações:

- Dias nublados: classe D;
- Calmaria: quando velocidade do vento for inferior ou igual a 0,5 m/s;
- Noite: De 1h após o pôr do sol até 1h antes do nascer do dia seguinte;
- Radiação solar:
 - Forte: altitude solar $>60^\circ$, com céu claro;
 - Fraca: altitude solar entre 15° e 35° , com céu claro.

2.4.4. Topografia

A dispersão de poluentes é influenciada diretamente pelas condições meteorológicas de vento, turbulência e consequentes elevação e transporte horizontal da pluma com a movimentação de massas de ar sob efeito do empuxo térmico (diferença de temperatura) e *momentum*, e também pela topografia da área.

Segundo Paz (2004), estudos mostram que gradientes de fluxo de calor sensível e latente e de temperatura do ar na Camada Limite Planetária são diretamente influenciados pela superfície e que o escoamento na CLP é orientado, além dos demais fatores, pelas variações na topografia e rugosidade das superfícies.

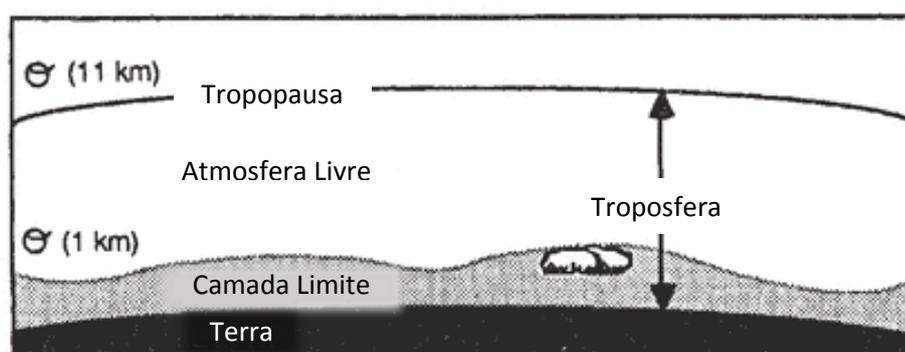
Moraes (2004) descreve que terrenos planos são os que não possuem elevações ou quando apresentam, elas são insignificantes para o escoamento ao seu redor, os terrenos complexos, por sua vez, geram recirculações que influenciam o escoamento, devido às suas elevações, como são os casos de áreas montanhosas e com vales.

A complexidade da topografia, portanto, ocasiona mudanças no vento e na turbulência atmosférica, sendo fator preponderante no mecanismo de dispersão atmosférica (CARVALHO, 1999).

2.4.5. Camada Limite Planetária

A camada atmosférica relevante para a dispersão de poluentes atmosféricos é, segundo Turner (1969), a mais próxima do solo, que varia de centenas a milhares de metros. Essa camada é a troposfera que se estende por mais de 11 km de altitude (ROSA, 2012), como pode ser vista na Figura 7. As variações na velocidade do vento, nos fenômenos de turbulência são maiores na camada em contato com a superfície, parte da troposfera influenciada diretamente pelas características da superfície (TURNER, 1970; STULL, 1988). Essa camada é a Camada Limite Planetária (CLP).

Figura 7 – Divisão da troposfera em duas regiões: camada limite próxima à superfície e até em torno de 1 km e a atmosfera livre até os 11 km de altitude



Fonte: Adaptado de Stull, 1988.

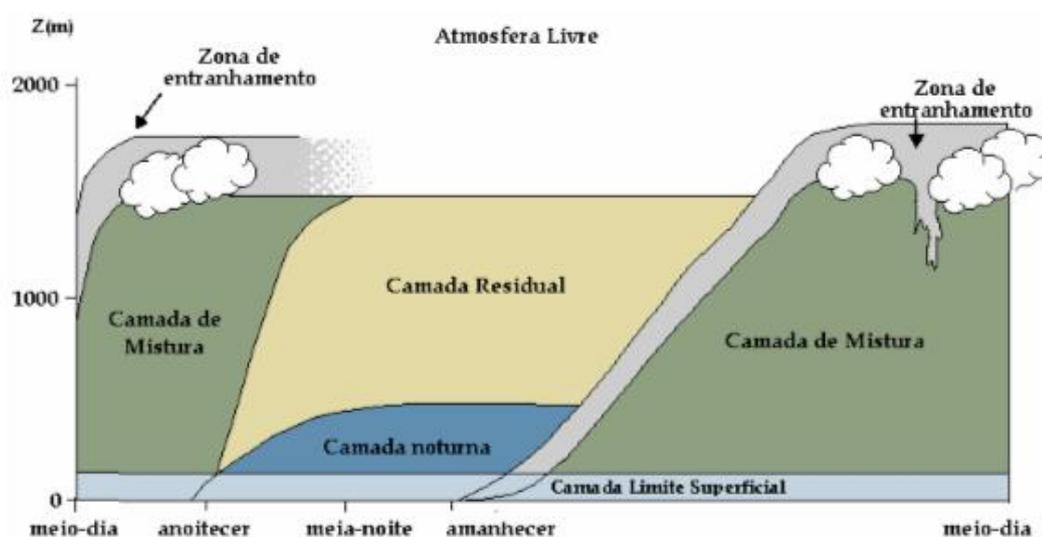
Paz (2004) afirma que o conhecimento da CLP constitui num aspecto predominante para o estudo da poluição atmosférica, pois as fontes de poluentes localizam-se em sua maioria na superfície e a dispersão vertical dos poluentes depende da turbulência gerada na CLP.

As forças na superfície que governam a dispersão na CLP são: emissão de poluentes, contato friccional, transferência de calor, evaporação e transpiração, mudanças de fluxo pelo terreno (STULL, 1988).

A camada limite planetária não possui altura constante ao longo do espaço e do tempo, varia conforme o ciclo do dia e a superfície. Durante o dia, a altura da CLP pode chegar a mais de 1 km, devido à transferência de calor da superfície aquecida para a atmosfera mais fria, criando uma mistura vertical intensa. No entanto, à noite, ocorre a transferência de calor no sentido contrário, reduzindo os movimentos turbulentos e assim a CLP pode atingir menos de 100m (MORAES et al., 2010 apud ROSA, 2012).

A CLP pode ser classificada em três camadas conforme a turbulência: camada de mistura com muita turbulência, camada residual menos turbulenta e camada limite estável com turbulência esporádica, desenvolvida durante a noite. Em relação à camada limite durante o dia, pode ser chamada de camada limite convectiva (CLC), em que pode ocorrer o fenômeno de inversão térmica (STULL, 1991 apud ROSA, 2012). As diferentes camadas são ilustradas na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura da camada limite planetária com a presença da camada de mistura, camada residual, camada estável noturna e zonas de entranhamento



Fonte: Stull, 1988 apud Paz, 2004.

A camada de mistura é resultado do aquecimento da superfície pela radiação solar, que começa a ser formada nas primeiras horas do dia. O ar aquecido tende a ascender e o mais frio a descer, gerando vórtices turbulentos que provocam a mistura de poluentes com o ar e caracterizam essa camada. No final do dia, à medida que a radiação incidente diminui, a camada residual é formada, caracterizando-se pelo resíduo de turbulência da camada anterior. À noite, a camada estável se forma pelo resfriamento da superfície, período em que a turbulência é mínima, causada apenas pelo efeito do cisalhamento do vento. Quanto mais a superfície está resfriada, maior é a redução da camada residual e aumento da estável, pela maior quantidade de calor transferida da atmosfera aquecida para a superfície. As zonas de entranhamento são onde ocorrem as trocas de calor e quantidade de movimento entre a CLP e a atmosfera livre (PAZ, 2004).

2.5. Modelos Matemáticos

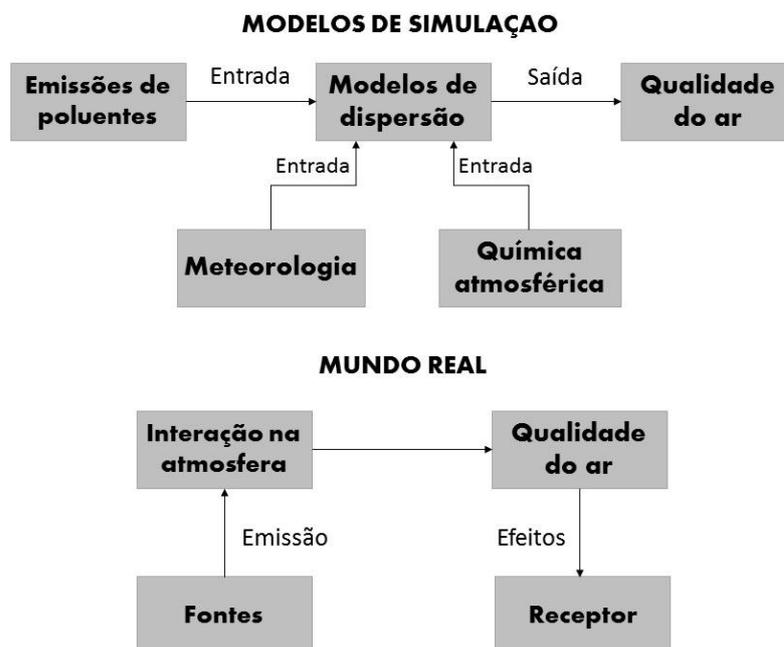
O movimento, o transporte e a dispersão de substâncias no solo, na água ou no ar são processos complexos e seu estudo experimental é dificultoso. Diante disso, os modelos matemáticos constituem uma importante ferramenta para o conhecimento e estudo desses processos, pois simulam o transporte e dispersão de poluentes, além de estimar as concentrações das substâncias no meio de interesse, a partir de dados de entrada da fonte, do meio (topografia) e meteorológicos.

Segundo NIWA (2004), modelos são extensamente utilizados na ciência para fazer predições, resolver problemas e indicar possíveis soluções para o gerenciamento de recursos ambientais e podem ser físicos (representação em baixa escala da realidade) e matemáticos, que utilizam equações e relações matemáticas.

Os modelos matemáticos são algoritmos numéricos/analíticos que descrevem o problema e são amplamente utilizados em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos. De acordo com Kawano (2003), modelos matemáticos facilitam o entendimento do comportamento dos poluentes no meio ambiente e objetivam prever a concentração deles na atmosfera. São úteis para controle de emissões, a partir de seu uso para estabelecer leis; avaliação de técnicas e equipamentos de controle instalados ou propostos; planejamento da gestão da qualidade do ar; planejamento de uso e ocupação do solo, ao indicar áreas críticas de poluição e gestão de novas fontes poluidoras (SEINFELD, 1986 apud KAWANO, 2003). São também cruciais para definição de redes de monitoramento da qualidade do ar; conhecimento da qualidade do ar e assim a relação com a saúde de receptores.

A Figura 9 exhibe um esquema do modelo de dispersão atmosférica e da realidade que ocorre na atmosfera. Na situação real, os poluentes emitidos sofrem vários processos reacionais e de diluição na atmosfera que caracterizam qualitativamente o ar. Os modelos indicam a qualidade do ar ao simular as concentrações dos poluentes a partir dos dados da fonte, de dados meteorológicos, da topografia e da química da atmosfera, ou seja, os modelos procuram reproduzir o que ocorre na atmosfera na realidade.

Figura 9 - Modelos de simulação e processo real que ocorre na atmosfera



Fonte: Adaptado de DERÍSIO, 2012.

Dentre os modelos baseados na conservação da massa, estão (JOHNSON et al.; MORAES, 2004; MACEDO, 2012):

- Modelos Eulerianos: utilizado para distribuições de emissões de área, em que a atmosfera é dividida em um grid de ‘caixas’, para o cálculo do fluxo de poluentes dentro e fora das ‘caixas’; soluciona de forma numérica a equação da advecção-difusão, em um referencial fixo em relação à terra;
- Modelos Lagrangeanos: baseado num sistema de referência que acompanha o movimento das massas de ar, que agregam emissões de poluentes à medida que passam por fontes poluidoras;
- Modelos Gaussianos: subclasse dos outros dois, baseado numa distribuição gaussiana do vento; prover uma solução fundamental e simples para a equação da difusão.

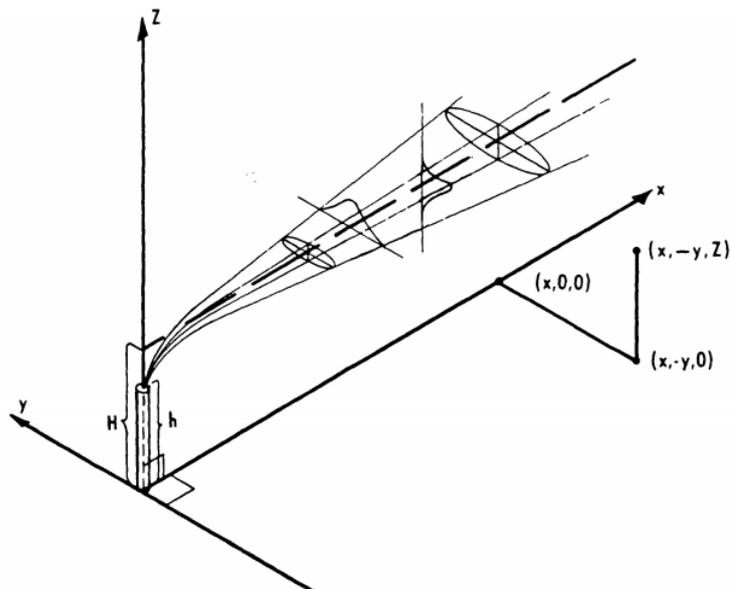
A escolha do modelo matemático de dispersão a ser utilizado dependerá de vários parâmetros como o tipo de fonte, a escala do estudo, o poluente, o tempo. Um dos modelos mais utilizados para estudos de dispersão de poluentes por fontes pontuais, de área e de volume, é o gaussiano.

2.5.1. Modelo Gaussiano

O modelo gaussiano é baseado na distribuição normal de concentração, em que os maiores valores encontram-se na linha central da pluma, e compreende dispersão horizontal e vertical dessa pluma, em regime estacionário, como pode ser observado na Figura 10. Para um perfil da pluma nos planos horizontal e vertical, a concentração é máxima sempre no centro da pluma, e diminui conforme os coeficientes de dispersão horizontal e vertical.

Em relação à fonte, a concentração da pluma na saída da fonte é elevada, pois não houve dispersão. À medida que a pluma se dispersa e se distancia da fonte na direção do vento os picos de concentração diminuem e a pluma se alarga.

Figura 10 – Esquema da pluma gaussiana



Fonte: Turner (1970).

Segundo Johnson et al. (1976), o modelo gaussiano só deveria ser utilizado para tempos longos de difusão e condições homogêneas e estacionárias, porém este modelo pode ser aplicado satisfatoriamente para várias outras aplicações.

O modelo gaussiano é identificado como modelo de pluma em estado estacionário, em que as emissões e condições meteorológicas são uniformes ao longo do domínio de modelagem, mas podem variar de hora em hora. No entanto, o cálculo em cada hora é independente da outra, o modelo calcula concentrações em uma média horária e fornece uma melhor representação da

realidade se as condições forem estáveis, sem mudanças significativas na hora que está sendo modelada.

As equações de concentração de substância do modelo gaussiano são uma solução de conservação de espécie, que reduzem as equações diferenciais a soluções analíticas simples, a partir de hipóteses simplificadoras e considerações (BOÇON, 1998). Algumas considerações assumidas para o modelo de dispersão gaussiano, conforme Khlaifi et al. (2008), são: Regime Estacionário em que a equação não depende do tempo, Vento com intensidade, direção e sentido constantes, terreno plano sem obstáculos, não ocorrem reações químicas com os poluentes, que se movimentam apenas pela ação do vento, fonte poluidora pontual, não existe perda de material poluidor.

A equação de transporte ou de difusão de Fick assume a forma:

$$u \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = D_y \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + D_z \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Onde:

u é a velocidade do vento (m/s);

C é a concentração da substância (g/m³);

D_y e D_z são os coeficientes de difusividade mássica nas direções transversal (y) e vertical (z).

Com as considerações acima citadas, desprezando a difusão turbulenta na direção do vento (eixo x), considerando D_y e D_z constantes e sujeita às condições de contorno:

$$\frac{\partial C}{\partial z} \text{ em } z = 0 \text{ é igual a } 0$$

(corresponde à reflexão total do solo)

$$C \rightarrow 0, \text{ quando } x, z \rightarrow \infty \text{ e } y \rightarrow \pm\infty$$

Tem-se a solução para equação diferencial de 2ª ordem, que indica a concentração do poluente num ponto x , y e z :

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (3)$$

Onde:

$C(x, y, z)$ é a concentração do poluente no ponto x , y e z (g/m³);

x, y, z são coordenadas cartesianas do ponto (m)

q é a taxa mássica de emissão do poluente (g/s);

u é a velocidade do vento obtida pela estação meteorológica (a 10m do solo) (m/s);

σ_y e σ_z são os desvios da pluma na direção transversal (y) e vertical (z) (m);

H é a altura efetiva da fonte (ex. chaminé).

Para a determinação dos desvios de dispersão σ_y e σ_z , que dependem da estabilidade atmosférica, do vento e da turbulência, Pasquill (1961) propôs classes de estabilidade a partir de parâmetros como velocidade do vento, intensidade da radiação solar e cobertura de nuvens, observados rotineiramente, como apresentado no subcapítulo 2.4.3. Essas classes foram utilizadas em sequência por Gifford (1961) que desenvolveu correlações para a determinação dos coeficientes de dispersão horizontal e vertical com a distância da fonte e a respectiva classe de estabilidade atmosférica, cujos valores aumentam com a instabilidade (BOÇON, 1998).

Johnson et al. (1976) e NIWA (2004), devido sobretudo às considerações iniciais adotadas para o modelo, relatam limitações do modelo gaussiano de uso convencional, como:

- Sobrestimar efeitos de terreno moderado a complexo, pois não contempla as flutuações do vento causadas pela topografia;
- Em condições de vento com velocidade inferior a 1 m/s, apresenta dificuldades para estimativas. Normalmente, estabelece-se uma velocidade mínima e ignora-se os dados abaixo desse limite;
- Assumir que a atmosfera é uniforme, ou seja, que as condições de dispersão e transporte não mudam da fonte até o receptor, no entanto diferenças no uso do solo, rugosidade da superfície, corpos de água, montanhas tornam a estrutura da camada limite não homogênea;
- Não estimar concentrações em estados meteorológicos não uniformes como em condições convectivas;
- Não é adequado para poluentes reativos e secundários, devido à não validade da superposição de contribuições de fontes individuais sobre os receptores;
- Concentrações não dependem do tempo nas aplicações mais usuais.

Apesar das limitações do uso convencional do modelo gaussiano, as equações de pluma gaussiana são extensamente utilizadas, devido a sua simplicidade, à necessidade de recursos computacionais e dados meteorológicos simples, à obtenção de σ_y e σ_z , parâmetros

característicos para a dispersão da pluma, por experimentos de dispersão atmosférica reais. Além de que quando há dados de variações na direção e velocidade do vento, a determinação dos desvios pode ser feita para as condições locais, o que se traduz em resultados melhores, ao considerar parâmetros como a turbulência, estabilidade atmosférica e rugosidade do terreno local (BOÇON, 1998; NIWA, 2004).

Segundo Boçon (1998), ao longo dos anos, modelos matemáticos mais complexos que mantêm a distribuição gaussiana por considerar os coeficientes de dispersão constantes, mas incorporam efeitos diferentes das considerações iniciais, como terrenos irregulares, reações químicas, diferentes fenômenos físicos e químicos envolvidos na dispersão atmosférica, vem sendo desenvolvidos. O autor entende que isso deve-se às dificuldades de reproduzir em laboratório as condições atmosféricas reais, o que leva a um avanço da capacidade computacional e desenvolvimento de modelos e *softwares* mais robustos.

Apesar de modelos físicos e experimentos em campo serem cruciais para o estudo de fenômenos mais fidedignos aos problemas reais da atmosfera e mesmo o mais sofisticado modelo de dispersão atmosférica não prever com máxima precisão a localização, magnitude e tempo de concentrações, o uso de modelos (em especial os aprovados pela EPA) mais desenvolvidos com o auxílio de *softwares* especializados gera resultados razoavelmente precisos e é satisfatório para estudos de dispersão atmosférica de poluentes (NIWA, 2004).

2.5.2. Modelo AERMOD

O AERMOD é um modelo de dispersão atmosférica euleriano de pluma estacionária de distribuições gaussianas, desenvolvido na década de 1990 pelo *AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee* (AERMIC), comitê formado pela Sociedade Americana de Meteorologia (AMS) e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), com o objetivo de criar um modelo regulatório similar ao antecessor ISC3 (*Industrial Source Complex Model*), mas que incorporasse os conceitos da Camada Limite Planetária (CLP) estudados na década de 80. O AERMOD é recomendado e apresentado na revisão do Guia de Modelos de Dispersão do Ar da EPA desde 2005, após vários testes comparativos com outros modelos e dados reais de superfície. É um modelo de dispersão de pluma em regime estacionário para vários poluentes atmosféricos e fontes pontuais, de área ou volume, que simula a dispersão e transporte de substâncias na camada limite atmosférica. O modelo contempla fontes poluidoras

em áreas urbanas e rurais, em terrenos simples e complexos, incorpora os efeitos de edificações (*building downwash*) para o fenômeno dispersivo da pluma (EPA, 2005).

Há outros modelos de dispersão de ar bastante utilizados e indicados no guia da EPA que são divididos em duas categorias de sofisticação: *Screening* e *Refined*. Os modelos *screenings* são técnicas de estimativas simples que usam as condições mais desfavoráveis e geram resultados mais conservativos, como o SCREEN3 e o AERSCREEN. Os modelos refinados são aqueles mais detalhados, que requerem dados de entrada mais precisos e provém estimativas de concentração mais especializadas, com maior precisão e promovem maior efetividade de estratégias de controle da poluição. Dentre os modelos refinados e preferencialmente recomendados pela EPA para usos regulatórios, está o AERMOD, que compreende distribuições gaussianas na vertical e horizontal para condições de camada limite estável e convectiva, sendo distribuição gaussiana na horizontal e utilizando-se de uma função de probabilidade de densidade bi-gaussiana para o estudo da velocidade de convecção na vertical. É um aprimoramento do modelo gaussiano convencional, necessitando menos dados de entrada e empregando melhores parametrizações para caracterização meteorológica e de dispersão que outros modelos, como o ISC3 (EPA, 2005).

O ISC3 foi substituído pelo AERMOD, que contém algoritmos novos ou aprimorados para dispersão nas camadas limites estável e convectiva, penetração da pluma em inversões elevadas, dispersão e alargamento da pluma, computação de perfis verticais de turbulência, temperatura e vento, camada limite noturna urbana, processamento de receptores, efeitos das construções e caracterização dos parâmetros da Camada Limite Planetária (CLP) (EPA, 2004). O AERMOD aplica-se para terrenos complexos e assim como o seu precursor incorporou o algoritmo PRIME (*Plume Rise Model Enhancements*) para efeitos das construções na dispersão (*Building Downwash*). Segundo EPA (2005), que realizou vários testes, o AERMOD provê melhor caracterização da dispersão da pluma que o ISC3 e significativos avanços no uso do PRIME, também incorporado neste modelo em sua versão ISC3ST. Em relação à performance do AERMOD em terrenos complexos, ele se mostrou superior ao ISC2ST e CTDMPLUS (*Complex Terrain Dispersion Model PLUS*), algoritmos para uso nestes tipos de terrenos, na estimativa dos efeitos dos tipos de terreno sobre a dispersão de poluentes, assim como para os efeitos de *downwash*, que o ISC-PRIME apresentou performances um pouco piores.

Perry et al. (2005) estudaram a performance do AERMOD para aplicações regulatórias em relação a concentrações observadas para 17 bases de dados de estudos de casos, que incluem locais com terrenos simples e complexos, condições urbanas e rurais, alturas de lançamento

superficiais e elevadas, e com e sem efeitos de construções. As estimativas do AERMOD foram comparadas com as de outros modelos de dispersão (ISCST3, HPDM, RTDM, CTDMPLUS) para avaliar sua performance também em relação a esses modelos usuais. Para os 10 estudos sem efeitos de construção, o AERMOD apresentou o melhor resultado na reprodução da distribuição de concentração para emissões em bases elevadas em terrenos moderados a complexos. Resultado similar a este, ocorreu para terrenos simples, devido aos algoritmos para condições convectivas que tratam de forma mais apropriada a elevação da pluma. O modelo também obteve uma boa performance para o único caso em condições urbanas e para os estudos com efeito *downwash*, indicando a sensibilidade da dispersão ao comportamento meteorológico e à geometria de construções. Em suma, o AERMOD apresentou performance superior ao ISCST3 e similar aos HPDM e CTDMPLUS, uma vez que as formulações do AERMOD foram baseadas em trabalhos anteriores que desenvolveram esses modelos.

Seangkiatiyuth et al. (2011) aplicaram o sistema de modelagem do AERMOD para estudo de impacto ambiental por emissões de NO₂ de um complexo de cimento na Tailândia. Os resultados simulados em condições úmidas e secas foram comparados com os experimentais realizados durante sete dias de medições contínuas em doze receptores e mostraram que os picos de concentração se localizavam de 1 a 5 km da fonte emissora, em que a simulação e as medições experimentais estavam em concordância, ao contrário das concentrações além de 5 km do ponto de referência, em que o AERMOD demonstrou-se limitado para a predição de poluentes. O estudo demonstrou que as concentrações de dióxido de nitrogênio medidas e simuladas usando o AERMOD não excederam os limites estabelecidos pelos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (NAAQS) da Tailândia e que o AERMOD provê informações úteis para identificar áreas de alto risco de poluição, constituindo-se importante ferramenta de gestão de impacto ambiental.

Diante do extensivo desenvolvimento e da avaliação de sua performance, o AERMOD é atualmente o modelo mais recomendado pela EPA e apropriado para aplicações regulatórias e também para terrenos complexos, efeitos de prédios e até para fontes em linha – que possuem modelos específicos - se houver combinação apropriada de fontes pontuais e de volume.

A concentração total de poluente, cuja equação geral para terrenos planos e complexos é apresentada abaixo, corresponde à soma dos dois estados possíveis da pluma, o horizontal, que se refere à condição convectiva C e estável S e a pluma correspondente à superfície, ou seja, sob influência da topografia, como é visualizado na Figura 11.

$$C_T(X_y, Y_y, Z_y) = f \cdot C_{C,S}(X_y, Y_y, Z_y) + (1 - f)C_{C,S}(X_y, Y_y, Z_p) \quad (4)$$

Onde:

$C_T(X_y, Y_y, Z_y)$ é a concentração total do poluente;

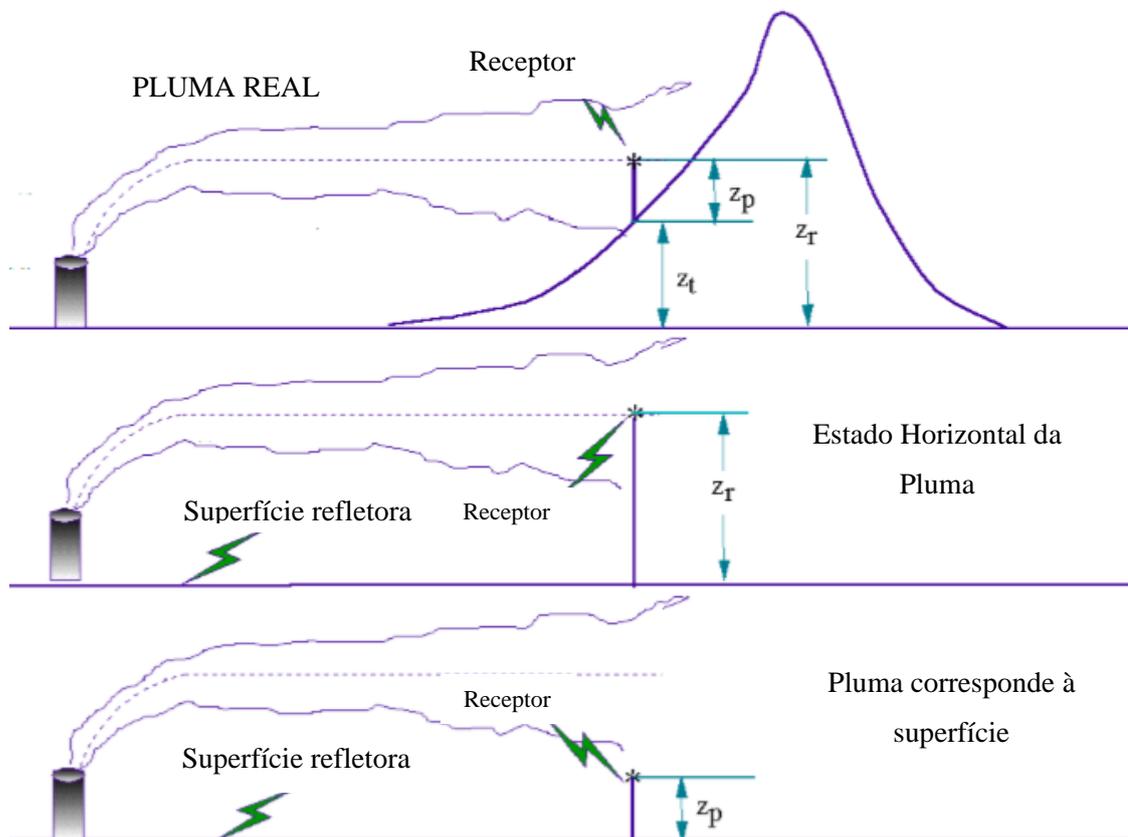
f é a função da pluma no estado soma;

(X_y, Y_y, Z_y) são as coordenadas do receptor;

$C_{C,S}(X_y, Y_y, Z_y)$ é a contribuição da pluma no estado horizontal;

$C_{C,S}(X_y, Y_y, Z_p)$ é a contribuição da superfície.

Figura 11 – Relação entre a pluma real e a pluma dada pelo AERMOD, caracterizada pela soma das duas possibilidades de pluma



Fonte: Adaptado de EPA, 2004.

Onde:

$Z_r = Z_p + Z_t$ é a altura do receptor em relação à altura da base da fonte (chaminé);

Z_t é a altitude do terreno em que está o receptor em relação à altura da base da fonte;

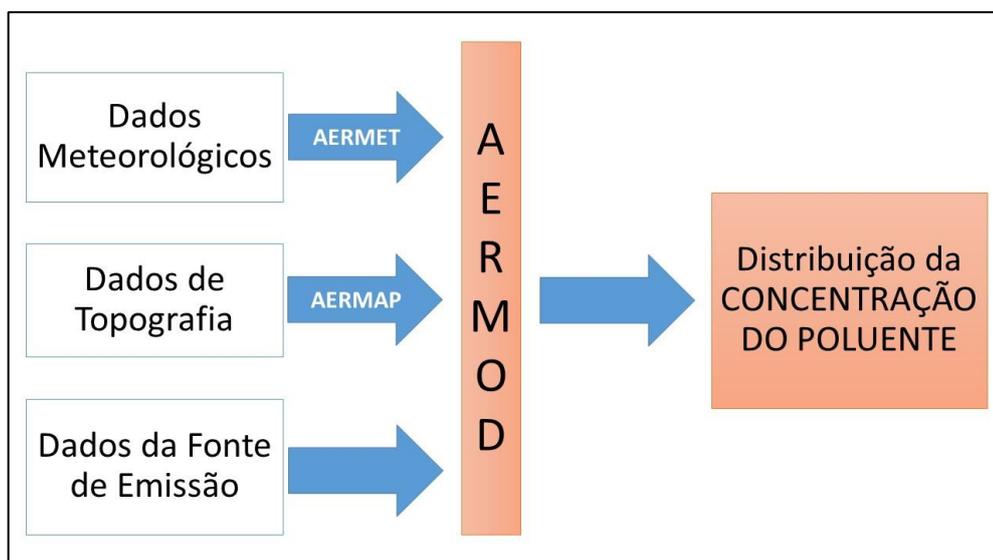
$Z_p = Z_r - Z_t$ é a altura do receptor em relação à altitude do terreno em que ele está.

Obs.: Para qualquer valor de concentração calculado, as alturas Z são determinadas em relação à altitude em que se encontra a base da fonte, ou seja, a altitude do terreno em que se encontra a fonte.

Ressalta-se que em terrenos planos, nos casos em que a fonte e o receptor estão na mesma altitude em relação ao nível do mar, ou seja, $Z_t = 0$, Z_p é igual a Z_r , portanto a equação se reduz à contribuição apenas do estado horizontal da pluma. Se o receptor não possuir dimensão vertical ($Z_p = 0$), Z_t é igual a Z_r , ou seja, a altura do receptor corresponde essencialmente à altitude do terreno em relação à altura de base da fonte.

Este modelo de pluma gaussiana, segundo EPA (2005), utiliza a escala da camada limite planetária para a caracterização da estabilidade atmosférica, o método de Briggs por aproximações iterativas para a ascensão da pluma, exceto quando envolve os efeitos de construções, em que uma solução numérica das leis de conservação de *momentum*, energia e massa é utilizada. O modelo estima concentrações médias de poluentes horárias até anuais e foi desenhado conforme o esquema a seguir (Figura 12):

Figura 12 - Esquema da Estrutura de Modelagem no AERMOD



Fonte: Adaptado de Macedo, 2012.

O sistema de modelagem do AERMOD consiste em um modelo de dispersão com os pré-processadores AERMET e AERMAP, incorporados no sistema, que possuem a função de fornecer ao modelo os dados meteorológicos de entrada e os de terreno e receptores, respectivamente, para a obtenção da distribuição da concentração do poluente.

O AERMET fornece ao AERMOD as informações meteorológicas necessárias para a caracterização da CLP, a partir de dados horários meteorológicos: velocidade e direção do vento, temperatura, umidade relativa, pressão, radiação e cobertura de nuvens além de dados da superfície, como rugosidade e albedo. Estes dados são variáveis necessárias para o cálculo de parâmetros da CLP como velocidade de fricção na superfície (u^*), altura da camada limite convectiva (CLC), fluxo de calor sensível na superfície H (W/m^2), comprimento de Monin-Obukhov (L). Estes e outros parâmetros são utilizados pelo AERMOD para calcular perfis verticais de velocidade de vento (u), desvios padrão da flutuação lateral e vertical da pluma (σ_y e σ_z), gradiente de temperatura potencial ($\frac{d\theta}{dz}$), característicos da dispersão da pluma. O AERMET produz dois tipos de dados: dados de superfície e dados de perfis com medidas da estação meteorológica utilizada. Logo, a partir de medições meteorológicas, representativas da área de modelagem em estudo, este pré - processador computa parâmetros da CLP necessários para que o AERMOD estime perfis verticais de vento, turbulência e temperatura, sendo a concentração do poluente estimada pelo modelo em todas as distâncias durante a hora modelada governada pelos fatores meteorológicos médios daquela hora (EPA, 2004, 2005).

O AERMAP, através de dados de terreno a partir de um Modelo de Elevação Digital (*Digital Elevation Model – DEM*), calcula a escala de altura do terreno associada à localização de cada receptor e utilizada para o cálculo da divisão da linha de corrente. O AERMAP utiliza o sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM), que projeta os meridianos e paralelos da superfície da terra em um planisfério, retratando o planeta em uma superfície plana e é dividido em 60 zonas de seis graus de longitude cada, numeradas a partir do meridiano *International Dateline* de 180 graus de 1 a 60 (MACEDO, 2012). Conforme a mesma autora, os dados *DEM* consistem em perfis de vetores regulares de elevações, em que um perfil representa pontos de elevação ou nós, cujas elevações são referenciadas em latitude e longitude no sistema de coordenadas do *World Geodetic System* (WGS). Este pré-processador também é utilizado para criar a malha de receptores e fornece ao AERMOD, portanto, localização dos receptores (coordenadas x e y), a altitude do terreno em que ele está em relação à altitude da base da fonte (z_i) e a escala específica de altitude do terreno para cada receptor (h_c) (EPA, 2004, 2005).

O AERMOD é aplicado para uma série de fontes industriais, urbanas, rurais, de poluentes primários, como partículas em suspensão, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre, e emissões contínuas de substâncias tóxicas e perigosas de resíduos para fins regulatórios e não regulatórios, como processos de deposição.

Em áreas urbanas, o AERMOD contempla a turbulência para condições noturnas relacionadas ao efeito de ilha de calor que ocorre nessas áreas. A magnitude deste efeito é calculada pela diferença de temperatura entre às áreas rural e urbana que se desenvolve durante a noite e é definida pelo modelo através da inserção do dado de população da área contribuinte para o efeito da ilha de calor (EPA, 2015).

Para determinar se o modelo deve utilizar parâmetros urbanos, como coeficientes de dispersão urbanos, ou seja, se a fonte deve ser modelada por algoritmos urbanos, o Guia de Modelos de Qualidade do Ar da EPA indica a utilização de dois métodos: o *Land Use Procedure* (Procedimento de Uso do Solo) de Auer Jr. (1978), que inclui uma classificação do uso do solo para determinar se a área total, circunscrita por um raio de 3 km em torno da fonte, tem característica urbana ou rural, e *Population Density Procedure* (Procedimento da Densidade de População), que determina o uso dos coeficientes de dispersão urbanos se a densidade populacional for maior que 750 hab/km². Como esse método por densidade populacional não é adequado para casos como áreas fortemente industriais, que a densidade populacional é baixa, mas é suficiente urbana para utilização de parâmetros urbanos, a EPA considera que o método de Auer Jr. do Uso do Solo é mais definitivo, portanto deve ser preferencialmente utilizado (EPA, 2005). O quadro de classificação do uso do solo por Auer Jr. (1978) é apresentado abaixo:

Quadro 4 – Identificação e Classificação dos tipos de uso do solo por Auer Jr. (1978)

TIPOS	DESCRIÇÃO	
	USO E ESTRUTURAS	VEGETAÇÃO
I1	Forte industrialização - maioria de indústrias químicas, de aço e de fabricação, geralmente prédios de 3 a 5 andares com telhados planos	Crescimento de gramas e árvores extremamente raros, vegetação < 5%
I2	Moderada industrialização – pátios ferroviários, depósitos de caminhões, parques industriais, fabricações menores, geralmente prédios de 1 a 3 andares com telhados planos	Gramas muito limitadas, quase ausência de árvores, vegetação < 5%
C1	Comercial – escritórios, apartamentos e hotéis, prédios com mais de 10 andares, telhados planos	Árvores e gramas limitados, vegetação < 15%
R1	Residências comuns – habitações familiares geralmente com um andar, telhados com estruturas inclinadas, calçadas	Gramados abundantes e moderadamente arborizado, vegetação > 70%
R2	Residências compactas – famílias em espaços pequenos, habitações geralmente com menos de 2 andares, telhado com estruturas inclinadas, garagens, sem calçadas	Tamanho do gramado e árvore de sombras limitados, vegetação < 30%
R3	Residências compactas – muitas famílias vivendo próximos com menos de 2m de separação lateral, geralmente dois andares, telhado plano, garagem e sem calçadas	Tamanho do gramado e árvore de sombras antigas, vegetação < 35%
R4	Residências do estado – famílias vivendo em áreas grandes	Abundantes gramados e levemente arborizado, vegetação > 80%

A1	Áreas metropolitanas – parques municipais, estaduais e federais, cemitérios, campos	Quase totalmente gramado e levemente arborizado, vegetação > 95%
A2	Agricultura	Cultivos locais, vegetação > 95%
A3	Sem desenvolvimento – não cultivada	Gramas e ervas daninhas selvagens e levemente arborizado, vegetação > 95%
A4	Área rural não cultivada	Bastante arborizado, vegetação > 95%
A5	Superfícies de água – rios, lagos	

Fonte: Adaptado de Auer Jr., 1978.

Segundo o Guia de Modelos de Qualidade do Ar da EPA (EPA, 2005), se 50% ou mais da área total corresponder a usos do solo das classes I1, I2, C1, R2 e/ou R3, deve-se usar os coeficientes de dispersão urbana na modelagem, pois a área apresenta características fortemente urbanas.

Em relação ao uso do AERMOD para avaliação de impactos, Rosa (2012) avaliou o impacto causado pela operação de uma unidade de geração térmica de energia utilizando o AERMOD e por observação experimental. Os resultados obtidos pelo modelo para cenários de concentrações máximas e médias em 24h de SO₂, apesar das incertezas associadas aos dados de entrada, meteorológicos e de apresentar uma tendência de subestimar os valores observados, apresentaram boa correlação com os observados, o que indicou que as concentrações de SO₂ calculadas foram satisfatórias para a avaliação da fonte em estudo.

Para o estudo de fontes móveis, o AERMOD também é bastante utilizado. Macedo (2012) realizou um inventário de fontes móveis e avaliação da dispersão atmosférica de poluentes emitidos por veículos automotores em Campo Grande/MT com o uso do AERMOD. A avaliação da dispersão atmosférica por modelagem foi feita em avenida próxima a uma universidade, considerando as duas vias de sentidos contrários e obtendo pelo modelo as concentrações de CO, MP e NO_x para veículos leves de passeio, caminhões e motocicletas, inseridos no modelo por vias como fontes lineares de emissão de poluentes. Os resultados encontrados mostraram que limites de CO e NO_x foram ultrapassados principalmente para motocicletas e veículos leves, situação que pode ser extrapolada para outras avenidas da cidade. A dispersão pelo AERMOD seguiu a direção predominante dos ventos e foi recomendado pela autora a realização de monitoramento da qualidade do ar para acompanhamento e controle dessas emissões.

A modelagem matemática é bastante utilizada também para a definição de rede de monitoramento da qualidade do ar em uma cidade. Um estudo da dispersão de poluentes atmosféricos no município de Maringá – RS desenvolvido por Rodrigues (2013) estimou

concentrações de CO, PTS, SO₂ e NO_x emitidos por indústrias e veículos e determinou as áreas mais críticas e assim os pontos da rede de monitoramento sugeridos para a cidade. A utilização do modelo AERMOD se mostrou uma ferramenta útil na escolha dos locais das estações de monitoramento desta cidade.

3. METODOLOGIA

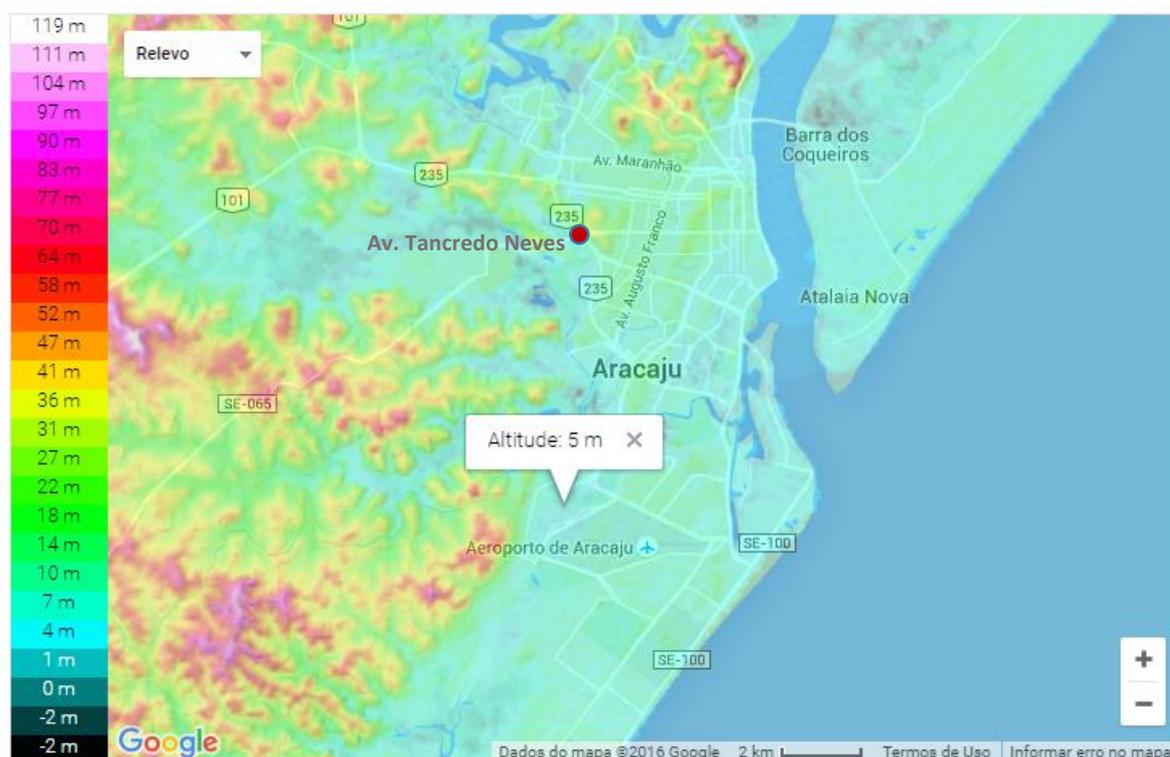
Este trabalho de avaliação de poluição veicular foi realizado com o auxílio do *software* AERMOD View V.6.8.6, pacote completo da *Lakes Environmental* que inclui o modelo AERMOD, pelo qual foi estimada a concentração de NO_x, CO, MP emitidos por veículos leves (carros de passeio), motocicletas e veículos pesados (ônibus e caminhões) na Avenida Tancredo Neves, em Aracaju-SE.

3.1. Descrição da Área de Estudo

3.1.1. Município de Aracaju-SE

A cidade de Aracaju é a capital do estado de Sergipe, ocupa uma área de 181,8 km², localiza-se sobre um relevo de planície marinha, no litoral, banhado pelo Oceano Atlântico, sendo cortada pelos rios Poxim e Sergipe. O município possui uma população de 571.149 habitantes, segundo último censo do IBGE em 2010, clima megatérmico úmido e sub-úmido, com precipitação média anual de 1.590 mm e temperatura média anual de 26 °C. (ARACAJU, 2013). A cidade possui uma frota de mais de 200.000 veículos e apresenta fluxos intensos de veículos em suas avenidas principais (DETRAN-SE, 2016). A altitude de Aracaju é em torno de 5 m, com algumas regiões mais elevadas, mas a maioria do terreno não ultrapassa 40m de altitude, conforme pode ser visualizado no mapa apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Mapa de Aracaju com as elevações em relação à nível do mar, em que os tons mais escuros indicam maiores altitudes e tons mais claros em tonalidade azul e verde menores altitudes.



Fonte: Topographic-map, 2016.

3.1.2. Área em estudo

A área de estudo escolhida para avaliação da poluição atmosférica localiza-se na Zona Oeste de Aracaju-SE e compreende parte dos Bairros América, Jabotiana, Siqueira Campos, Novo Paraíso, Capucho, Ponto Novo e José Conrado de Araújo. A avaliação da dispersão de poluentes emitidos por veículos foi realizada na Avenida Presidente Tancredo Neves, trecho entre a Maternidade Nossa Senhora de Lourdes (MNSL) e o Terminal Rodoviário José Rollemberg Leite, nas duas vias de circulação: via 01 (sentido sul-oeste) e via 02 (sentido oeste-sul).

Na Figura 14 pode-se observar a localização do trecho da Av. Tancredo Neves em estudo, com indicação das duas vias analisadas pelo modelo.

Figura 14 - Localização das duas vias do trecho da Avenida Tancredo Neves em estudo, Aracaju-Se. Via 01 (ícones amarelos) possui sentido bairro-centro e via 02 (ícones azuis) possui sentido centro-bairro.



Fonte: Google earth, 2014.

Esta avenida é uma das vias principais do município de Aracaju, liga as zonas sul e oeste da cidade, dá acesso à região central, ao Hospital de Urgência de Sergipe, maior hospital público do estado, ao terminal rodoviário Governador José Rollemberg Leite, a diversos órgãos públicos estaduais e federais, assim como a bairros populosos e à saída da cidade, o que se traduz num intenso fluxo de veículos pesados (ônibus e caminhões).

A avenida foi escolhida para avaliação da poluição atmosférica por possuir tráfego intenso de veículos nos horários críticos do dia (Figura 15 e Figura 16), ser área mista residencial com vocação comercial por possuir estabelecimentos ao redor como restaurantes, faculdade, órgãos públicos, possuir em suas margens receptores críticos como hospital, maternidade e alta densidade populacional nos bairros no seu entorno.

Figura 15 – Trânsito intenso de veículos na Av. Beira-Mar no dia 25/04/2016 às 07:21.



Fonte: Imagens da câmera da SMTT, 2016.

Figura 16 – Trânsito intenso de veículos na Av. Beira-Mar no dia 25/04/2016 às 18:06.



Fonte: Imagens da câmera da SMTT, 2016.

3.2. Dados de Entrada no AERMOD

Para o estudo em questão, os seguintes dados de entrada são necessários: fatores de emissão de CO, NO_x, MP pelos veículos leves (g/km), motocicletas (g/km) e pesados (g/km), quantidade de veículos por intervalo de tempo que passa pelas vias, velocidade média dos veículos (km/h).

Os fatores de emissão (FEs) utilizados foram os apresentados no Relatório de Emissões Veiculares de 2014 da CETESB para o Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrogênio, Material Particulado referentes às fases L5 (veículos leves), P7 (ônibus e caminhões) do PROCONVE e M3 (motocicletas e similares) do PROMOT. Para o cálculo da taxa de emissão de poluentes foram utilizados os fatores de emissão para veículos leves novos movidos a gasolina, ônibus urbanos (todos os ônibus contabilizados foram considerados dessa categoria) e caminhões médios movidos a diesel, e motocicletas com mais de 150 cilindradas movidas a gasolina. Os FEs utilizados são apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Fatores de Emissão em g/ km de veículos leves, motocicletas a gasolina, ônibus e caminhões a diesel.

FATORES DE EMISSÃO	
FE CO p/ veículos leves novos a gasolina (g/km)	0,216
FE NO _x p/ veículos leves novos a gasolina (g/km)	0,015
FE MP p/ veículos leves novos a gasolina (g/km)	0,001
FE CO p/ ônibus urbanos a diesel (g/km)	0,539
FE NO _x p/ ônibus urbanos a diesel (g/km)	0,015
FE MP p/ ônibus urbanos a diesel (g/km)	0,021
FE CO p/ caminhões médios a diesel (g/km)	0,081
FE NO _x p/ caminhões médios a diesel (g/km)	0,009
FE MP p/ caminhões médios a diesel (g/km)	0,009
FE CO p/ motocicletas a gasolina (g/km)	0,82 (>150 cc)
FE NO _x p/ motocicletas a gasolina (g/km)	0,07(>150 cc)

Fonte: CETESB, 2014b.

Segundo Lemos (2010), a velocidade média dos veículos nas principais vias de São Paulo reduziu de 29 para 27 km/h de 2006 para 2007, sendo para os ônibus um valor cerca de duas vezes menor. Para esta avenida em análise, foi considerada a velocidade média de 33 km/h, para todos os veículos contabilizados, independente da categoria, pois a ferramenta rota do *Google Maps* indica que o tempo médio para atravessar um trecho de 1,0 km da avenida em estudo é de 2 min (0,033 h) nos três horários mais críticos do dia, resultando numa velocidade média de 33 km/h para os veículos que circulam pelas vias (GOOGLE MAPS, 2016).

Para determinar a quantidade de veículos que circulam na avenida em um dia, foi realizada contagem de veículos a partir da filmagem da avenida no dia 25/04/2016 (segunda-feira), obtida pelo videomonitoramento da Secretaria Municipal de Transporte e Trânsito (SMTT). A filmagem escolhida foi de um dia útil que apresenta fluxo intenso de veículos nos horários de pico, característicos do trecho da avenida em estudo. As categorias contabilizadas na contagem foram motocicletas, caminhões, ônibus, micro-ônibus, e veículos de passeio, que englobou as demais categorias de veículos.

A contagem foi realizada contemplando os veículos que passam na via 01 no trecho da avenida em estudo nos três horários de pico: 7 h às 8 h, 12 h às 13 h, 18 h às 19 h, para que a pior situação fosse avaliada. O fluxo de veículos que circula na via 02 foi considerado o mesmo que o contabilizado na via 01. Como a câmera faz uma rotação aproximadamente a cada 30 s, filmando em torno de 38 s outro ponto sem ser o ponto da avenida cujos veículos são

contabilizados, estimou-se proporcionalmente e o número de veículos que passam na avenida durante essa pausa de 38 s. O número de veículos contabilizados nos três horários de pico representou o fluxo de veículos diário no trecho analisado.

3.3. Modelagem Matemática

Vários tipos de fontes podem ser estudados pelo modelo AERMOD, tanto fontes pontuais como chaminés quanto fontes móveis como veículos automotivos. Neste trabalho, as fontes de poluentes são as vias de tráfego, que podem ser consideradas para a modelagem como fontes de área alongadas ou de linha. Destaca-se que as fontes lineares no AERMOD são analisadas **como fontes separadas de volume** (VICENTINI, 2011).

O procedimento para obtenção das curvas de distribuição de concentração dos poluentes pelo *software* AERMOD View segue as seguintes etapas:

- Definição da área de modelagem a partir da direção predominante dos ventos na região e dos receptores principais e inserção das coordenadas do ponto de referência;
- Seleção da projeção geográfica, do datum, da zona UTM e hemisfério em que o Estado está inserido;
- Levantamento dos dados da fonte: taxa de emissão, diâmetro, altura de lançamento acima do chão, temperatura e velocidade de saída dos gases, coordenadas de início e fim do trecho da fonte de linha em análise;
- Inserção dos dados meteorológicos no modelo, que são processados pelo AERMET. São inseridos dados de superfície e do perfil meteorológico local;
- Levantamento da topografia da área de domínio da modelagem e inserção no modelo;
- Levantamento dos principais receptores e inserção de suas coordenadas no modelo;
- Seleção das médias requeridas pela legislação pertinente para cada poluente a ser modelado;
- Finalmente, simulação das dispersões atmosféricas pelo modelo AERMOD para os poluentes selecionados.

3.3.1. Dados Meteorológicos e Obtenção da Rosa dos Ventos

Para o processamento do AERMET foram utilizados dados meteorológicos disponíveis de superfície (.sfc) e perfil (.pfl) dos anos de 2011 e 2012, obtidos a partir da estação meteorológica Santa Maria, localizada no Aeroporto de Aracaju, a 7 km da Avenida em estudo.

O pré-processador AERMET utiliza a classificação de estabilidade atmosférica apresentada na Tabela 5 para as categorias de velocidade de vento (m/s).

Tabela 5 – Categorias de velocidades do vento e classificação da atmosfera

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	CLASSE
1,54	A – extremamente instável
3,09	B – medianamente instável
5,14	C – ligeiramente instável
8,23	D – neutra
10,23	E - estável

Fonte: AERMOD *View* 6.8.6, 2016.

3.3.2. Cenário de Modelagem

O cenário de modelagem para a simulação no AERMOD *View* é composto por duas vias de tráfego de veículos. Os poluentes considerados foram o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e as partículas totais suspensas (PTS). Para a comparação com os padrões estabelecidos na CONAMA N° 03/90, as modelagens foram feitas para as médias de concentração indicadas na Resolução e apresentadas no Quadro 5 a seguir:

Quadro 5 – Médias de concentração estabelecidas para os padrões de qualidade do ar pela CONAMA N° 03/90

PARÂMETRO	MÉDIAS
Partículas Totais em Suspensão	Média geométrica anual
	Média de 24 horas
Monóxido de carbono	Média de 8 horas
	Média de 1 hora
Dióxido de nitrogênio	Média geométrica anual
	Média de 24 horas

O sistema de coordenadas utilizado foi o UTM (*Universal Transverse de Mercator*), a zona UTM em que Sergipe está inserido é a 24 no Hemisfério Sul, parâmetros selecionados no

AERMOD View. Os dados de elevação de terreno processados pelo AERMAP foram do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM37), único disponível para todo o planeta, dentre as opções que o *software* oferece, baseado no datum WGS84 (*World Geodetic System* 1984) (EPA, 2015).

Como a área total, circunscrita por um raio de 3 km em torno da fonte, correspondeu mais de 50% às classes de uso do solo (AUER JR., 1978) C1, R2 e R3, o grupo da fonte é urbano e foi utilizado coeficiente de dispersão urbano para que o AERMOD considere no cálculo a camada convectiva formada durante a noite em áreas urbanas.

A população considerada para que o modelo calcule a magnitude do efeito de mistura limitada por processos de inversão térmica ocorrido durante a noite em zonas urbanas foi a soma da população residente total dos bairros inseridos na área de modelagem, ou seja, da área de influência da avenida. Os dados de população residente por bairro obtidos do trabalho de Fonseca et al. (2010), apresentados na Tabela 6, são referentes a Contagem realizada pelo IBGE no ano de 2007 (IBGE, 2016), portanto foi estimada a população residente para cada bairro no ano de 2015 pela multiplicação da taxa de crescimento anual indicada pelos autores, cujos valores calculados são exibidos na Tabela 7.

Tabela 6 – População residente nos bairros da área de estudo em 2007

BAIRRO	ÁREA (km²)	POP. RESIDENTE (2007)	TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL (%) 2000-2007
América	1,2114	15.692	-0,58
Capucho	2,7175	889	0,36
Jabotiana	6,4796	12.844	4,28
José Conrado de Araújo	0,9913	13.418	0,27
Novo Paraíso	0,8074	11.627	-0,22
Ponto Novo	1,6158	20.931	0,92
Siqueira Campos	1,5393	15.705	0,98

Fonte: Aracaju, 2007; Fonseca et al., 2010.

Tabela 7 – Estimativa da População residente nos bairros da área de estudo em 2015 e densidade populacional

BAIRRO	POP. RESIDENTE (2015)
América	14.979
Capucho	915
Jabotiana	17.960
José Conrado de Araújo	13.711
Novo Paraíso	11.424
Ponto Novo	22.522
Siqueira Campos	16.979
TOTAL	98.489
Densidade (hab/km²)	6.411

Fonte: O autor.

Como o modelo AERMOD não é tão sensível para o valor do número habitantes (EPA, 2015), a população considerada foi de 99.000 habitantes.

Outras considerações para a modelagem:

- Área de modelagem: 2,5 km x 2,5 km;
- Utilização do Grid cartesiano uniforme;
- Relevo sem ondulações significativas;
- Elevações do terreno e escala de altitude de cada receptor inseridas pelo AERMAP *View*;
- Fonte não possui dimensão vertical, estando sobre o terreno e lançamento de poluentes ao nível do solo;
- Total de veículos leves e motocicletas contabilizados foram considerados movidos à gasolina e os veículos pesados (ônibus e caminhões) a diesel, por não ser possível por inspeção visual a identificação do combustível utilizado por cada veículo;
- Emissão de poluentes por toda a linha (via) considerada, proporcional à quantidade de veículos por categoria em um intervalo de tempo.

3.3.3. Dados da Fonte de Emissão

As vias de tráfego de veículos são consideradas fontes de linhas e foram inseridas no modelo com dois nós cada, que indicam o início e fim das vias. As coordenadas dos nós das fontes lineares são apresentadas no Quadro 6 a seguir:

Quadro 6 – Coordenadas geográficas das vias 01 e 02 da Av. Tancredo Neves em estudo

TRECHO DA AV. TANCREDO NEVES	COORDENADAS UTM
Via 01 - Início (Nó 1)	709562.00 / 8792042.00
Via 01 - Final (Nó 2)	709163.00 / 8792485.00
Via 02 - Início (Nó 1)	709153.00 / 8792480.00
Via 02 - Final (Nó 2)	709550.00 / 8792033.00

Fonte: Google earth, 2014.

Taxas de Emissão de poluentes

As taxas de emissão de cada poluente foram determinadas a partir de metodologia utilizada por Macedo (2012) que multiplica o fator de emissão, dado obtido do Relatório de Emissões Veiculares da CETESB de 2014, pela velocidade média dos veículos considerada, que foi de 33 km/h, como é exibida na Equação 4. Obteve-se a taxa mássica em g/h, mas para inserção no modelo em g/s, dividiu-se o valor por 3600 e multiplicou a taxa pelo número de veículos que passaram na via modelada correspondente a um dia, para estimar a concentração de poluentes gerada por todo o trecho de cada via analisada (Tabela 8).

$$Taxa\ de\ Emissão\ \left(\frac{g}{s}\right) = \frac{Fe\left(\frac{g}{km}\right) \cdot V_m\left(\frac{km}{h}\right)}{3600\left(\frac{s}{h}\right)} \quad (4)$$

Tabela 8 - Taxa de emissão (g/km) por poluente e categoria de veículos

CATEGORIA DOS VEÍCULOS	FATOR DE EMISSÃO (g/km)			Nº DE VEÍCULOS CONTABILIZADOS	TAXA DE EMISSÃO (g/s)		
	CO	NOx	MP		CO	NOx	MP
Veículos leves	0,216	0,015	0,001	8.536	17,0720	1,1856	0,0790
Motocicletas	0,820	0,070	-	2.165	16,4380	1,4032	-
Ônibus	0,539	0,015	0,021	417	2,0811	0,0579	0,0811
Caminhões	0,081	0,009	0,009	311	0,2333	0,0259	0,0259
TOTAL				11.429	35,8244	2,6726	0,1860

Fonte: O autor.

Dados das vias de tráfego de veículos da Av. Tancredo Neves

Foi modelado trecho de **600 m** (dimensão lateral da fonte) da Av. Tancredo Neves composto por duas vias com largura de **10 m** cada uma. A dimensão vertical da fonte é **aproximadamente zero**, visto que se encontra sobre o terreno. Ressalta-se que se a fonte estivesse em um prédio ou adjacente a ele, a altura efetiva de emissão seria maior que zero e, portanto, a fonte teria dimensão vertical a ser inserida no modelo, por exemplo, carros em viaduto. A altura de lançamento de poluentes pelo escapamento dos veículos foi considerada **aproximadamente zero**, por estar muito próxima ao solo, inclusive para os ônibus, a fim de simplificar a modelagem. A elevação de base da fonte (altura acima do nível do mar), ao ser inserida no modelo, foi considerada **zero**, pois as elevações são processadas pelo AERMAP *View*, de forma que não sejam duplamente contabilizadas.

Após a inserção das duas vias e seus dados, o AERMOD gerou 31 fontes de volume em cada via. Como a fonte é composta apenas por um segmento, os nós localizam-se nas extremidades.

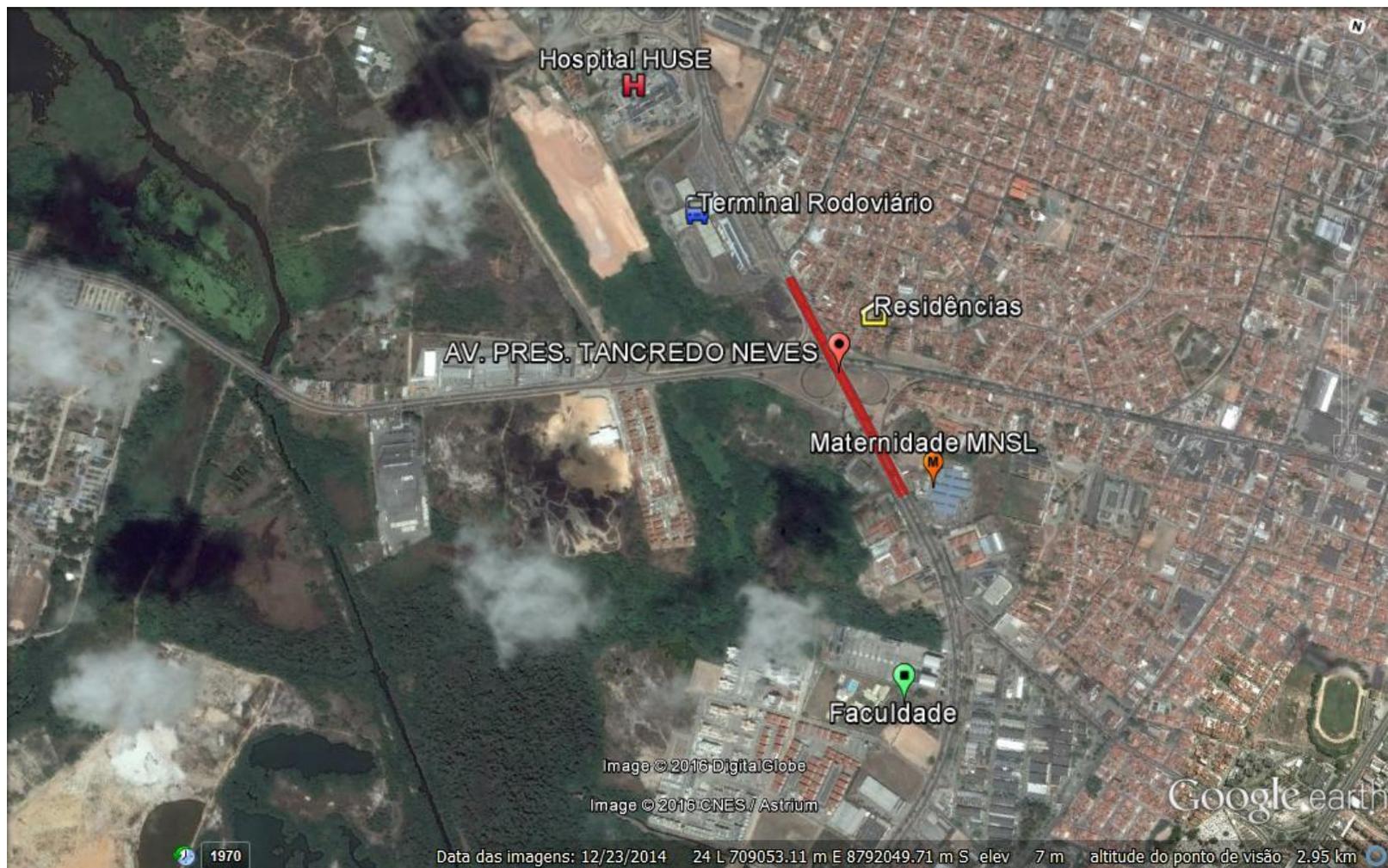
3.3.4. Receptores

Os receptores principais considerados no estudo, além da população residente nos bairros na área de modelagem, foram:

- O hospital de urgência do Estado de Sergipe (HUSE) a aproximadamente 875 m da metade do trecho da avenida em análise, por ser composto por grupos vulneráveis de pessoas em estado de recuperação de saúde;
- O terminal rodoviário José Rollemberg Leite, ao norte, próximo ao trecho da avenida em análise, por possuir um fluxo de grande quantidade de pessoas, incluindo jovens, adultos e idosos;
- A maternidade Nossa Senhora de Lourdes situada à margem direita da via 01 em análise, por ser composto por grupos sensíveis de pessoas, mulheres grávidas e bebês;
- A faculdade Pio Décimo, localizada ao sul do trecho em análise, a aproximadamente 785 m, por possuir um fluxo de grande quantidade de pessoas, incluindo jovens, adultos e idosos.

A localização dos receptores principais inseridos no modelo pode ser vista na Figura 17 e suas coordenadas são apresentadas no Quadro 7.

Figura 17 - Localização dos principais receptores na região de estudo



Fonte: Google earth, 2014.

Quadro 7 – Localização dos receptores principais discretos inseridos no modelo

AVENIDA TANCREDO NEVES	
RECEPTOR	COORDENADAS UTM
Residências	709390.00 / 8792412.00
Hospital	708673.00 / 8792818.00
Terminal Rodoviário	708904.00 / 8792556.00
Maternidade	709620.00 / 8792071.00
Faculdade	709672.00 / 8791558.00

Fonte: Google Earth, 2014.

Com o grid cartesiano, obtém-se uma malha uniforme, em que o modelo estima a concentração do poluente em cada nó da grade, que representa um receptor discreto na modelagem. A concentração nos pontos entre nós é estimada por interpolação. Os receptores foram espalhados na área de 2,5 km x 2,5 km definida para este estudo, que permite avaliação da dispersão horizontal da pluma de poluentes sobre a malha de receptores.

Além dos receptores considerados e apresentados acima, cabe destacar que os ciclistas que circulam diariamente na ciclovia existente entre as duas vias são receptores críticos, pois são os mais próximos das fontes, estando expostos diretamente aos poluentes emitidos pelos veículos.

3.3.5. Modelagem dos Óxidos de Nitrogênio

Segundo Janssen et al. (1988), em torno de 95 % dos óxidos de nitrogênio estão na forma de NO. Após a emissão, este é convertido em NO₂, tanto pela reação com o O₂ quanto com o ozônio presentes na atmosfera, podendo atingir uma conversão de 100% nos receptores. A reação de oxidação do NO na atmosfera é influenciada pela velocidade da reação e pelos processos de dispersão e diluição da pluma com o ar. A cinética química e os fenômenos físicos de transporte e mistura dependem das condições meteorológicas como a velocidade do vento e a radiação solar, e da concentração de reagentes, como o O₃, permitindo estimar a concentração de NO₂ no nível do solo a partir da taxa de emissão de NO_x pela fonte (PRIMO et al., 2005).

Assim, como os padrões de qualidade do ar da CONAMA N° 03/90 são de NO₂, pois dentre os compostos de nitrogênio do grupo dos óxidos, o NO₂ é o que mais comumente os receptores estão expostos, na modelagem de NO_x, uma opção do AERMOD de conversão de NO_x em NO₂ foi utilizada. A modelagem utilizou a opção *non-default* de conversão por meio

do Método de Ozônio Limitante OML (*Ozone Limiting Method*) oferecido pelo *software*, considerando os valores padrões sugeridos pelo modelo de concentração de ozônio no ar de 40 ppb, e da razão NO_2/NO_x de 0,1 na fonte, o que representa que 10% do NO_x emitido pela fonte está na forma de NO_2 .

3.4. Apresentação dos Resultados

Realizados a inserção dos dados de entrada da fonte e dos receptores, dos dados meteorológicos processados pelo *AERMET View* e o processamento dos dados topográficos pelo *AERMAP View*, rodou-se o modelo e obteve-se as distribuições de concentrações para PTS , CO e NO_x sob a forma de curvas de contorno para cada poluente, os denominados Mapas de Dispersão.

Para melhor visualização das concentrações às quais os principais receptores estão expostos foram inseridas imagens de satélite (*Google Earth*) atrás dos mapas de dispersão obtidos para cada poluente modelado.

A partir dos mapas de distribuição da concentração obtidos pelo *AERMOD View*, foi realizada uma análise comparativa das concentrações com os padrões de qualidade do ar primários e secundários estabelecidos pela CONANA N° 03/90, apresentados na Tabela 1 no item 2.3.1.

Ressalta-se que não foram modelados hidrocarbonetos, pois este poluente não é legislado nacionalmente. Os óxidos de enxofre também não foram modelados por não ser gerado em quantidade significativa pela fonte veicular. No entanto no estabelecimento de uma rede de monitoramento, é importante seus monitoramentos, pois eles são precursores de poluentes secundários e podem causar efeitos adversos para a saúde da população e o meio ambiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

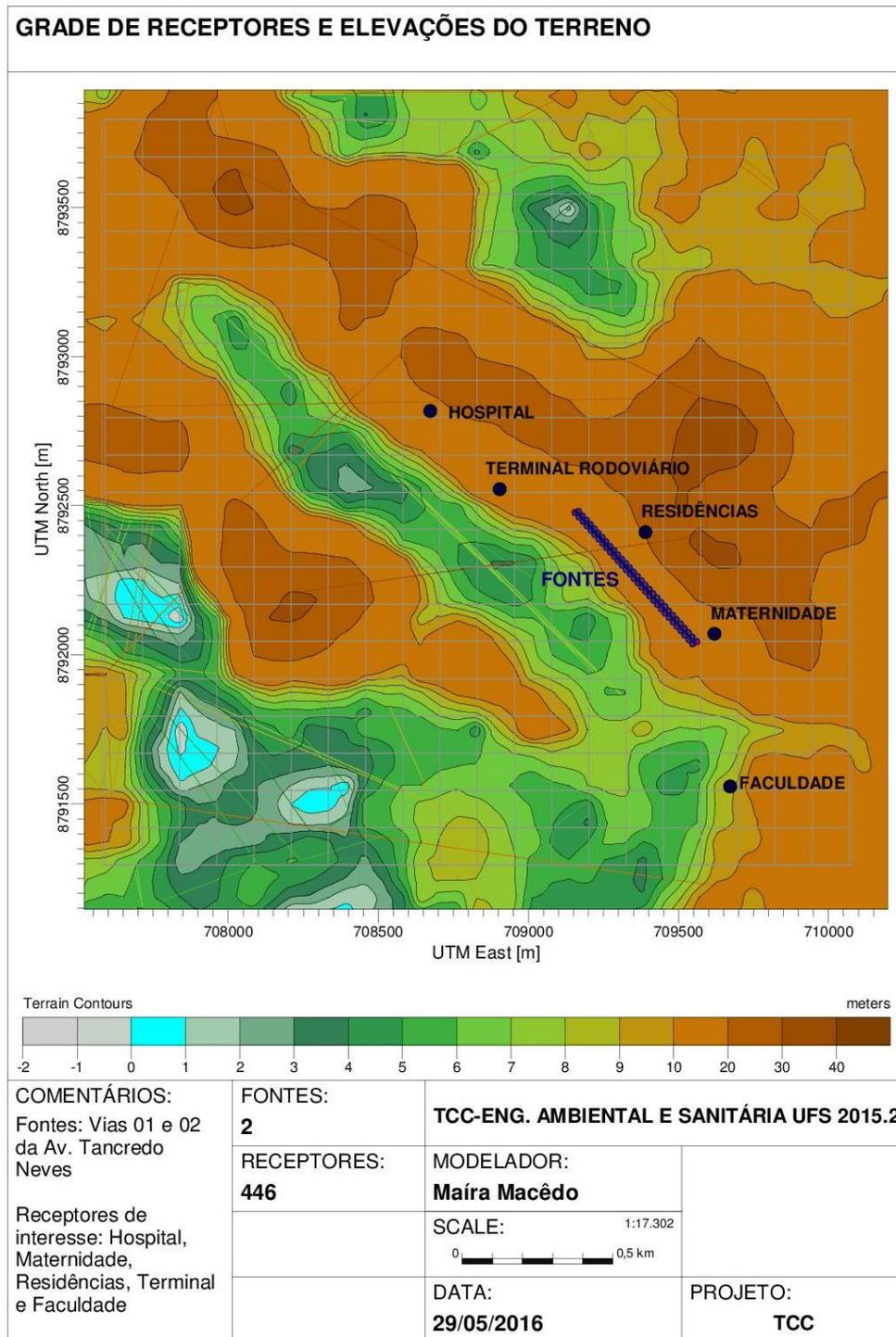
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da avaliação da poluição atmosférica veicular realizada com o modelo AERMOD, além disso a discussão dos resultados através da comparação com os padrões recomendados pela legislação nacional pertinente.

4.1. Grade de receptores e Elevações de terreno

Foi definida a área de domínio de modelagem com dimensões de 2,5 km x 2,5 km de modo que compreendesse os receptores de interesse e utilizado o grid cartesiano para formação da malha de receptores, totalizando 446 receptores. A partir da inserção dos dados topográficos pelo AERMAP *View*, foram obtidas as elevações do terreno da região em estudo.

A Figura 18 apresenta a grade de receptores uniforme sobre a área de domínio da modelagem. Também são apresentadas as curvas de elevação do terreno, onde as regiões em tons frios representam as menores altitudes e as cores quentes representam as maiores altitudes.

Figura 18 – Grade de receptores e curvas de altitudes do terreno na área de domínio da modelagem



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

Através da Figura 18, pode-se observar que as elevações do terreno em relação ao nível do mar da área de modelagem não ultrapassam 40 m, apresentando altitudes entre 4 a 30 m. As

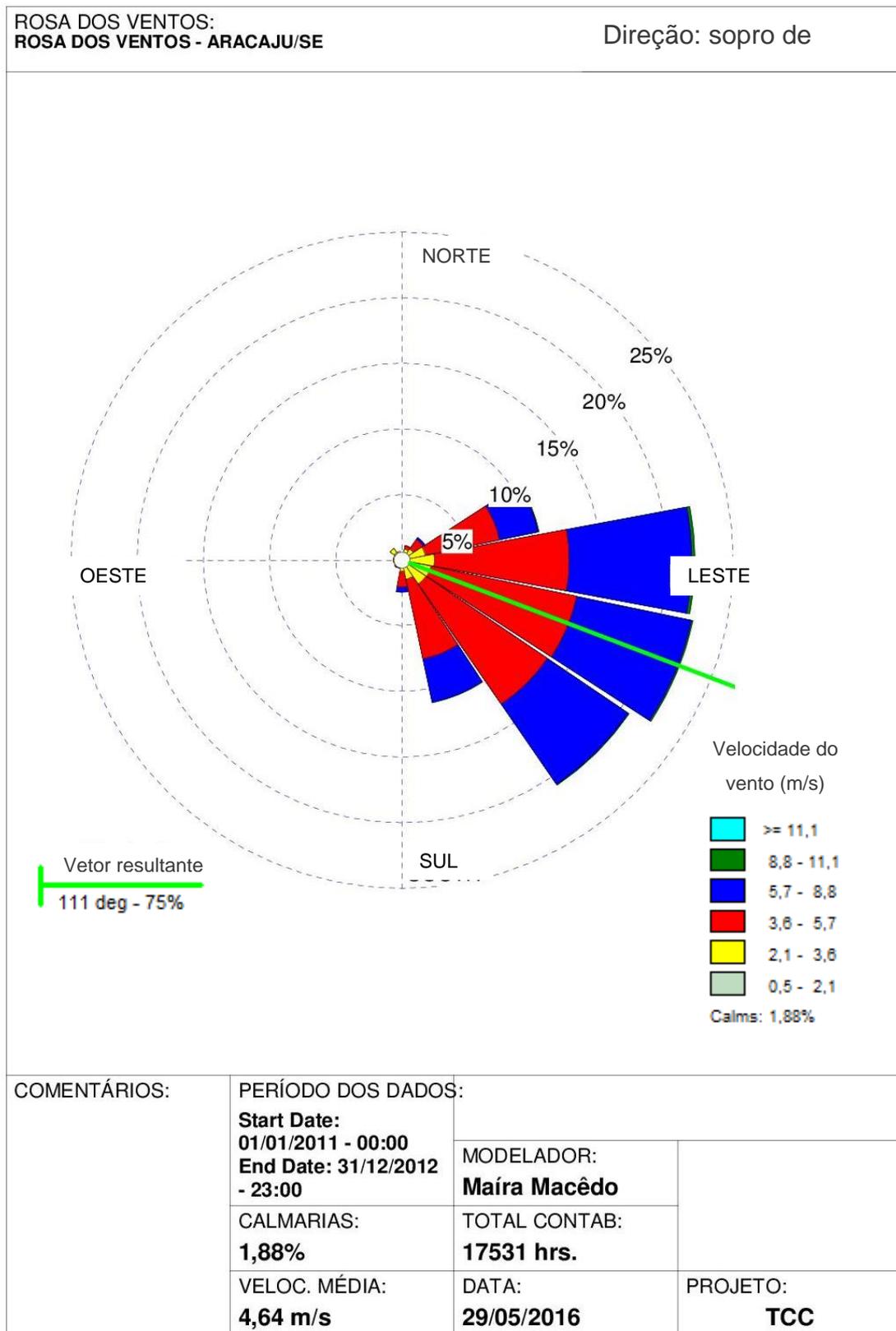
fontes lineares localizam-se inteiramente sobre terreno plano de altitude entre 10 a 20 m. Os receptores de interesse localizam-se em sua maioria no mesmo nível que as vias ou em níveis próximos como a faculdade, localizada em área de elevação de 9 m.

Percebe-se que a topografia é em sua maioria plana, sem grandes ondulações e orografias como montanhas e vales, características que se estende para a cidade como um todo, cujo relevo é composto por planície e cuja altitude é em sua maioria baixa, o que influencia positivamente a dispersão de poluentes, pois as correntes de ar possuem circulação mais livre, sem barreiras topográficas que dificultem a dispersão do ar.

4.2. Rosa dos Ventos

A partir dos dados do clima, velocidade e direção dos ventos disponíveis referentes aos anos de 2011 e 2012, obteve-se a rosa dos ventos de Aracaju-SE, apresentada a seguir.

Figura 19 – Rosa dos Ventos de Aracaju obtida com os dados meteorológicos de 2011 e 2012



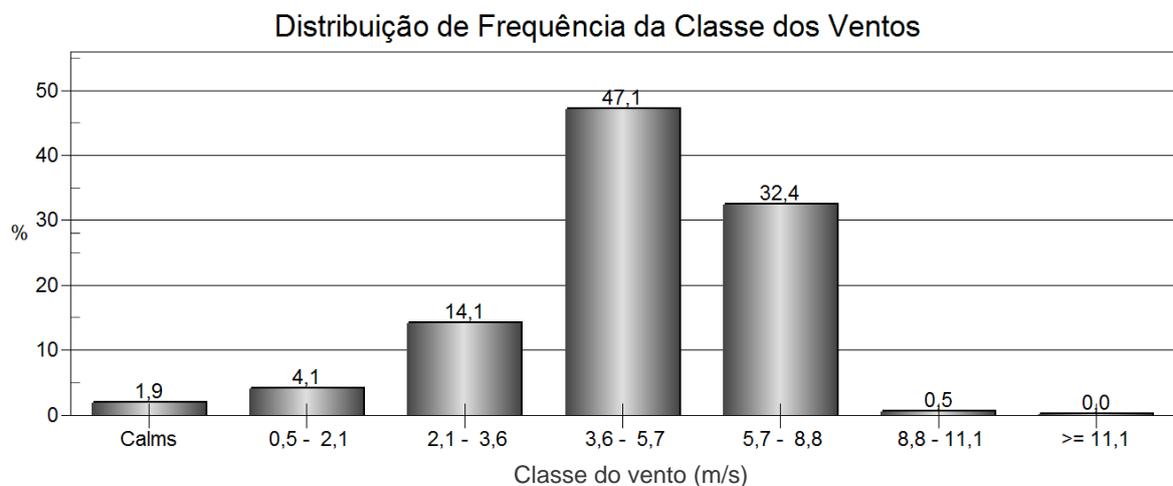
Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

A rosa dos ventos indica que os ventos predominantes em Aracaju sopram preferencialmente do sudeste para o noroeste, sendo, portanto, ventos sudestes com velocidade média anual de 4,64 m/s e calmaria média de 1,88 %. A segunda direção dominante é a nordeste.

Esses valores de velocidade média dos ventos e de calmaria indicam que o município de Aracaju possuiu nos anos de 2011 e 2012 condições meteorológicas que favorecem a dispersão de poluentes na atmosfera, com porcentagem de calmaria muito baixa não atingindo nem 5%. Ressalta-se que o clima quente e úmido da cidade também favorece a dispersão atmosférica.

A partir do Gráfico 4 de classificação dos ventos com as respectivas porcentagens, pode-se observar que as classes de estabilidade predominantes foram as B, C e D (valores na Tabela 5), logo, neste período dos dados meteorológicos utilizados a atmosfera foi instável na maioria do tempo (47,1 %), tendendo à neutra em boa parte do tempo (32,4 %), o que facilita a dispersão dos poluentes, por causa da turbulência gerada que caracteriza a instabilidade.

Gráfico 4 – Classes de Estabilidade dos Ventos para os dados meteorológicos de 2011 e 2012 de Aracaju



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

4.3. Fluxo de Veículos

A Tabela 9 mostra os resultados da contagem de veículos realizada a partir da filmagem das vias em abril de 2016 nos três horários de pico, que representaram um dia: 7 h às 8 h (1^{ah}), 12 h às 13 h (2^{ah}) e 18 h às 19 h (3^{ah}).

Tabela 9 – Número de Veículos circulantes na Av. Tancredo Neves

Categoria	1ªh	2ªh	3ªh	Total	%
Veículos leves	3.352	1.987	3.197	8.536	74,69
Motocicletas	708	556	901	2.165	18,94
Ônibus	183	103	131	417	3,65
Caminhões	140	97	73	311	2,72
Total	4.383	2.743	4.303	11.429	100,00

Fonte: O autor.

Foi observado que a maior frota de veículos que passa pelo trecho da avenida em estudo foi de veículos leves (carros de passeio), correspondendo a 74,69 %, em sequência foi a frota de motocicletas, de ônibus e caminhões, totalizando cerca de 11.429 veículos diariamente em circulação na avenida.

Observa-se que os maiores fluxos de veículos na avenida são nos turnos da manhã e noite, em virtude de serem os períodos do dia respectivamente que as pessoas vão em direção ao trabalho, ao comércio e às escolas e retornam para suas casas, após o expediente de trabalho.

A Avenida Tancredo Neves é uma avenida principal de Aracaju que liga a zona sul à zona oeste com bifurcações para a zona central do município, é, portanto, uma das vias com maior circulação de veículos na cidade, fato que se comprovou com a contagem de veículos realizadas, indicando uma taxa de circulação de aproximadamente 3.000 veículos leves por hora no horário entre 7 h e 8 h da manhã e 18 h às 19 h da noite.

Outra avenida de Aracaju, a Av. Beira Mar (trecho do cruzamento com a Av. Murilo Dantas), similar à Av. Tancredo Neves por ser via principal, ligar zonas da cidade (zona sul ao centro) e inserir-se em região residencial e comercial, foi também contabilizada através das filmagens da SMTT e apresentou um fluxo de 2.674 veículos no horário crítico da manhã e de 1.537 à noite, valores significativos, mas abaixo dos fluxos encontrados na avenida em estudo, equivalendo o fluxo pela manhã nesta avenida ao de meio-dia na Av. Tancredo Neves, que foi em torno de 2.700 veículos.

A avenida Costa e Silva, em Campo Grande-MT, cidade com frota de 315.024 veículos em 2010, que liga o centro a bairros da cidade, está ao lado da universidade federal e conecta o centro à saída em direção à São Paulo, semelhante à Av. Tancredo Neves, possui um fluxo diário de 7.582 veículos leves (carros de passeio e comerciais leves), 260 ônibus, 2.756 motocicletas, 594 caminhões e total de 11.192 veículos (MACEDO, 2012), valor total abaixo do obtido de 11.429 veículos para a avenida em estudo em Aracaju em apenas 3 horas.

Um estudo realizado pela Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) em cinco vias da cidade de São Paulo para desenvolvimento de metodologia para avaliação da

mobilidade urbana contabilizou os veículos que circulam nas avenidas entre 7h30 e 8h30 e mostrou que na Rua da Consolação, o número de veículos leves que passaram em uma das vias (sentido centro-bairro) foi de 2.338 e o total de veículos (leves, motocicletas, pesados) foi de 2.914. Em outra via de São Paulo analisada pela ANTP, a Avenida Sumaré (sentido centro-bairro), os resultados foram semelhantes, atingindo um fluxo de 2.044 veículos/h no horário da manhã citado. As vias analisadas pela ANTP possuem características similares à avenida Tancredo Neves: vias importantes da cidade de São Paulo, possuem largura em torno de 10 m, velocidade média entre 40 e 50 km/h e ligam zonas da cidade (BRASIL, 2015).

Observa-se que o fluxo horário na Tancredo Neves chega atingir valores maiores que as avenidas de São Paulo citadas, além disso, a frota atual de Aracaju de 284.681 veículos é significativamente menor que a de Campo Grande há 6 anos, em 2010, ou seja, pode-se afirmar que o fluxo de veículos encontrado na Tancredo Neves é alto em relação a outras avenidas principais de Aracaju e de outras similares fora do Estado, requerendo maior atenção quanto aos efeitos do trânsito de veículos sobre a qualidade de vida da população que trabalha, circula e reside próximo à Av. Tancredo Neves.

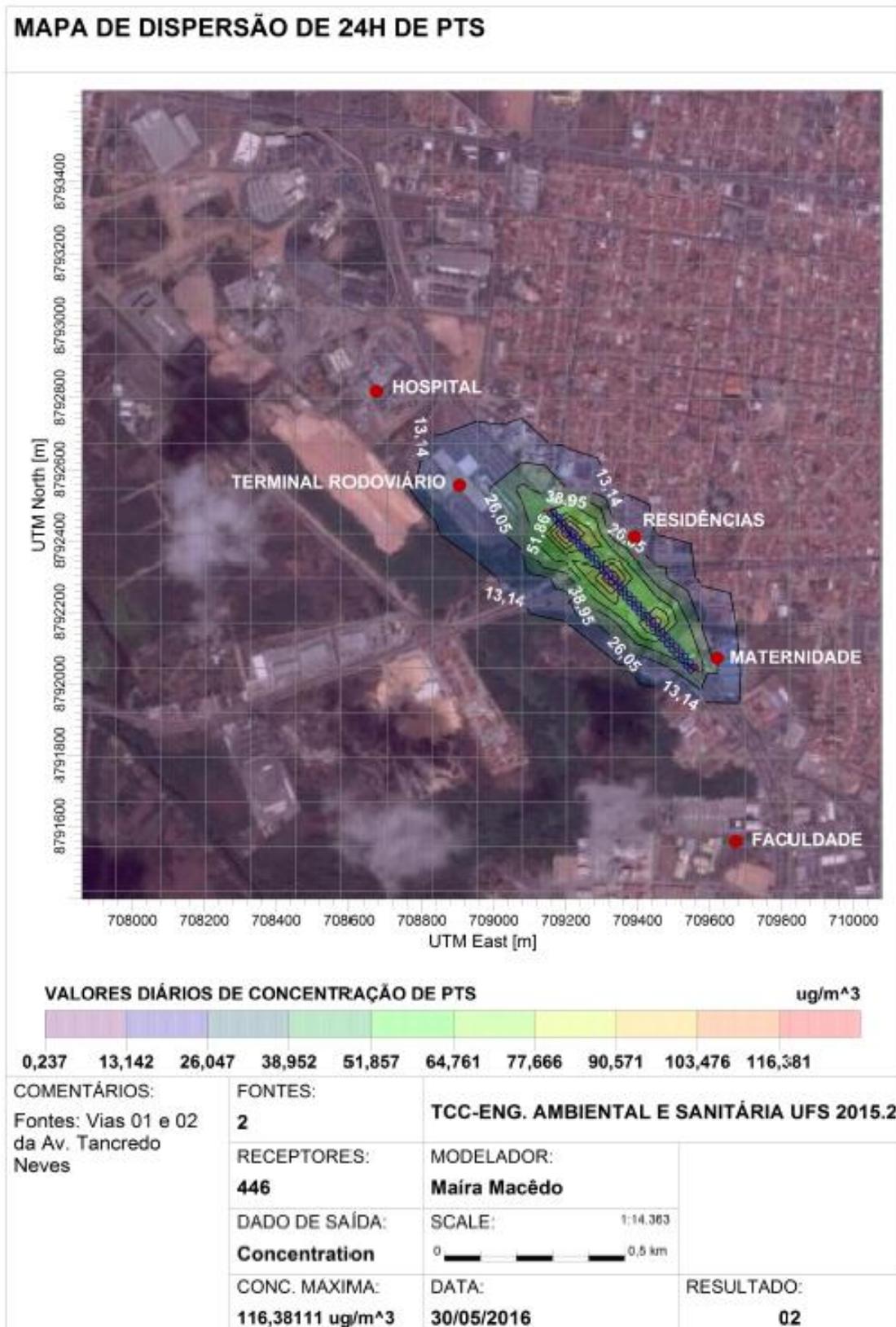
4.4. Simulações no AERMOD *View*

Nos subitens a seguir, serão apresentados e discutidos os mapas de dispersão dos poluentes atmosféricos obtidos na modelagem matemática das fontes lineares de veículos realizada com o *software AERMOD View*.

4.4.1. Partículas Totais Suspensas (PTS)

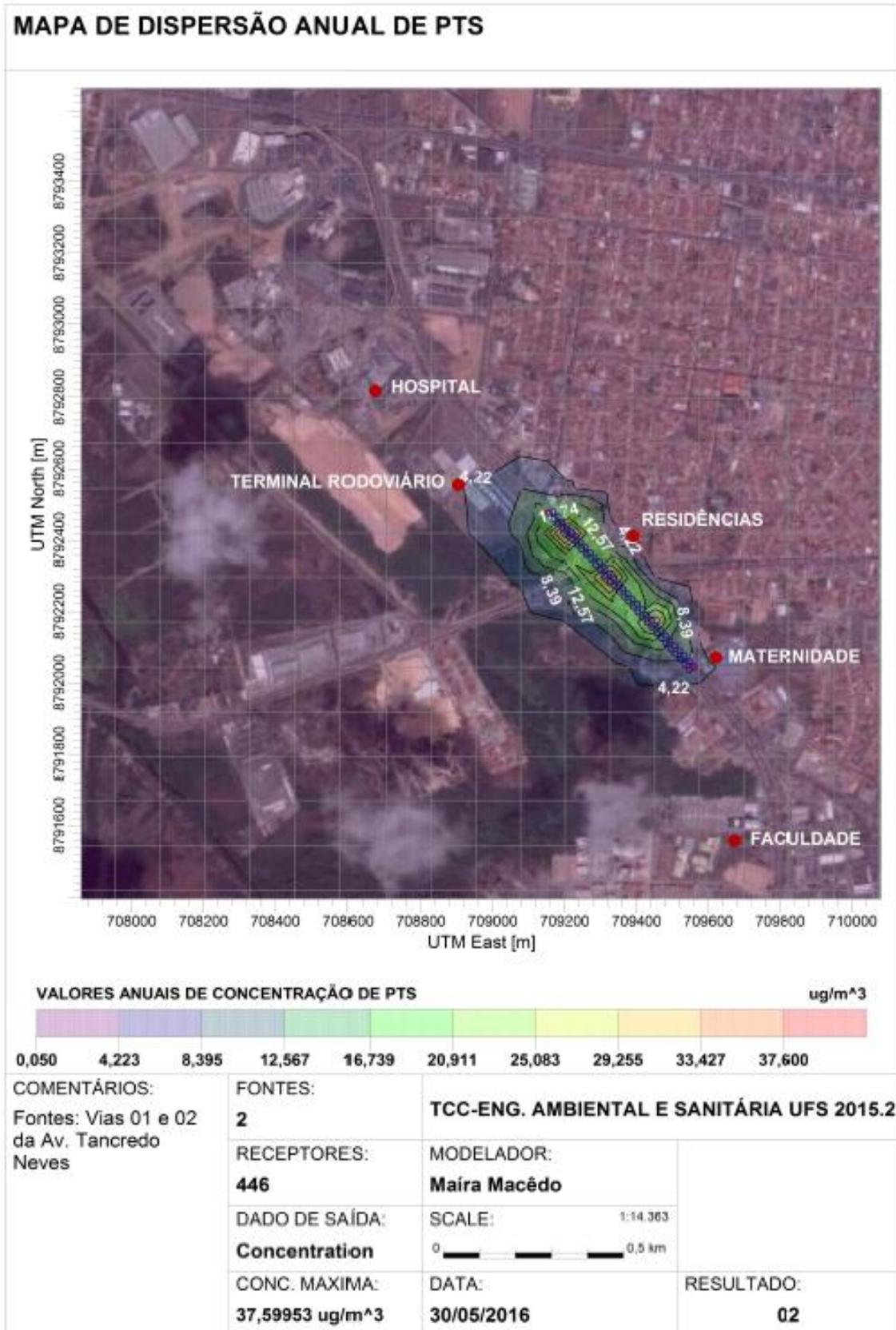
Os mapas de dispersão sobre a malha de receptores na região em estudo para as concentrações diária e anual de material particulado são apresentados nas Figura 20 e Figura 21.

Figura 20 - Mapa de dispersão diária de PTS na região da Av. Tancredo Neves



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

Figura 21 - Mapa de dispersão anual de PTS na região da Av. Tancredo Neves



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

A distribuição da pluma de PTS apresentou-se uniforme, tendendo à direção dos ventos predominantes de sudeste para noroeste, com três regiões de pico de concentração em torno das fontes. A partir da Figura 20, observa-se que os valores horários de concentração não ultrapassaram os padrões primário de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e secundário de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de qualidade do ar da res. CONAMA Nº 03/90, atingindo um valor máximo de $116,381 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 77,59 % do padrão secundário e 48,49 % do primário.

Os valores anuais de concentração exibidos no mapa de dispersão da Figura 21 também estão abaixo dos limites da legislação pertinente. A concentração máxima foi de $37,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 62,67 % do padrão secundário de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 47,00 % do padrão primário de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para média anual de PTS.

O trecho da avenida analisado cruza com a avenida José da Silva Ribeiro, que possui grande movimento de veículos, ligando a zona oeste com o centro e a saída para o município de São Cristóvão. Além disso, na região de entorno, há várias vias secundárias, que se fossem modeladas conjuntamente, elevariam os níveis de concentração obtidas. No entanto, como a avenida Tancredo Neves é a principal, com fluxo intenso de veículos e os valores de PTS resultaram significativamente abaixo dos padrões, não é esperado que os padrões sejam ultrapassados se forem modeladas também outras avenidas.

A contribuição de material particulado dos veículos não é muito significativa, com fatores de emissão de menos de $1 \text{ g}/\text{km}$, mas há outras fontes como ressuspensão do solo, formação secundária, suspensão de material em obras, que não foram contempladas neste estudo, mas que contribuem significativamente para a concentração de MP no ar. Um estudo realizado em área urbana em Aracaju por Almeida (2012), para determinação e avaliação da concentração total de elementos traço associados às partículas totais em suspensão, coletadas em filtros de fibra de vidro com amostrador de grande volume (AGV), indicou que há duas fontes emissoras de PTS, a ressuspensão do solo que foi o maior contribuidor na composição química devido à correlação com elementos típicos do solo, e o tráfego veicular, em que as concentrações de cobre, dióxido de enxofre e fumaça foram indicativos da ação antropogênica. Nesse contexto e considerando os efeitos para o sistema respiratório e circulatório humano, material particulado é um poluente que deve ser monitorado e controlado.

Em relação aos receptores de interesse, conforme mostra a Tabela 10 as concentrações máximas de PTS a que eles estão expostos também deram muito abaixo dos limites

estabelecidos pelo CONAMA, não indicando risco alto à saúde e a danos a materiais e vegetação devido à exposição a esse poluente.

Tabela 10 – Concentrações máximas de PTS que atingem os principais receptores

RECEPTORES	CONCENTRAÇÃO DE 24H DE PTS (µg/m³)	CONCENTRAÇÃO ANUAL DE PTS (µg/m³)	PADRÃO PRIMÁRIO (24H/ANUAL)– CONAMA 03/90 (µg/m³)	PADRÃO SECUNDÁRIO (24H/ANUAL)– CONAMA 03/90 (µg/m³)
Residências	26,05	4,22	250 / 80	140/60
Hospital	13,14	4,22		
Terminal Rodoviário	26,05	4,22		
Maternidade	26,05	4,22		
Faculdade	13,14	4,22		

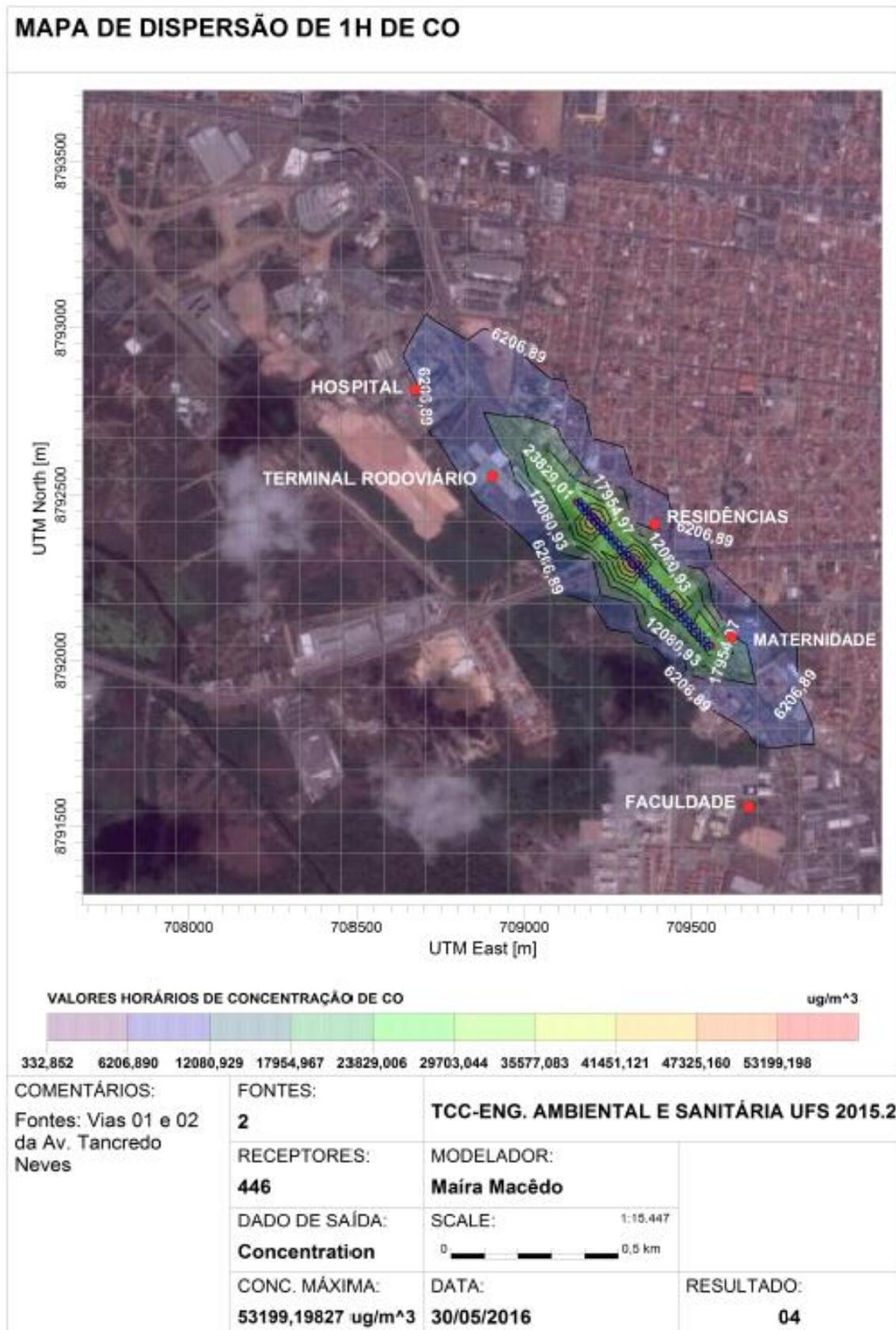
Fonte: O autor.

Todos os receptores de interesse localizam-se sob as curvas de concentração mais baixas de PTS, de cores azul escuro e roxa, esta última compreende a maioria da área de modelagem, devido à dispersão atmosférica e à redução da concentração à medida que se distancia da fonte, onde os maiores níveis do poluente se concentraram.

4.4.2. Monóxido de Carbono (CO)

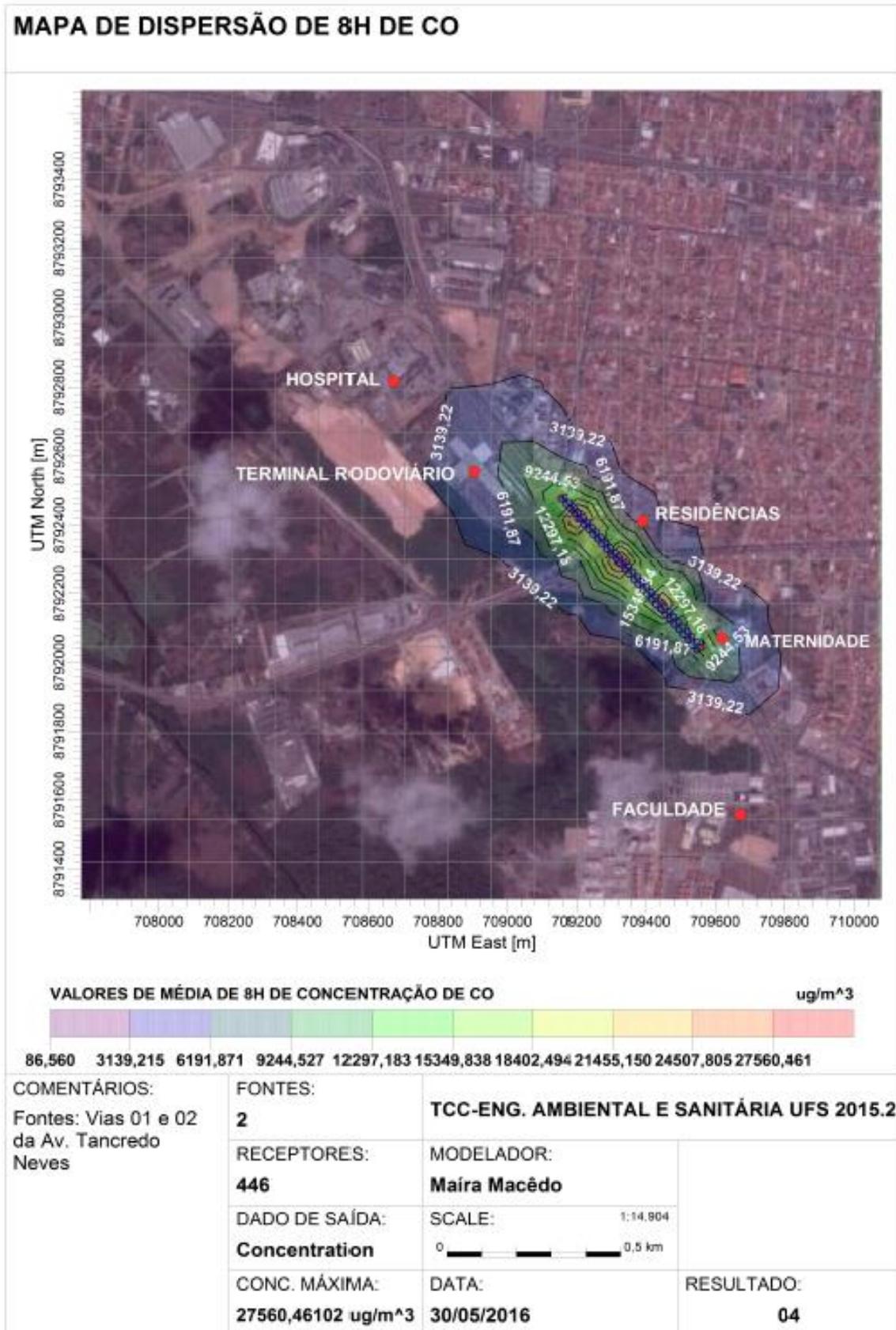
As Figura 22 e Figura 23 mostram os mapas de dispersão horário e de média de 8 h para o monóxido de carbono.

Figura 22 - Mapa de dispersão horária de CO na região da Av. Tancredo Neves



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

Figura 23 - Mapa de dispersão para média de 8h de CO na região da Av. Tancredo Neves



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

Pode-se notar que a máxima concentração encontrada foi de $53.199 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que ultrapassa em 33 % aproximadamente o padrão horário de $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. As concentrações acima do padrão são diluídas e dispersadas a partir das fontes, onde localizam-se três picos de concentração máxima, atingindo na última curva de nível (cor roxa), a concentração mínima de $32,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CO.

Os valores para a média de 8 h também ultrapassaram os padrões primário e secundário de $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atingindo concentração máxima de $27.560 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponde a mais que o dobro do limite indicado pela norma para preservação da qualidade do ar e de vida da população. Os níveis elevados de CO encontrados justificam-se pela taxa de emissão elevada de cada via, que resultou pelo cálculo em 35,82 gramas de CO por segundo, num total de 71,64 g/s que corresponde às duas vias emitindo simultaneamente.

Os valores dos padrões para média horária e de 8h, segundo a norma, não devem ser excedido mais de uma vez no ano, logo, os resultados da modelagem desse poluente serve de alerta quanto à qualidade do ar da região e os efeitos sobre a saúde e o bem-estar da população, pois o fluxo intenso de veículos nesta avenida é característico dos dias úteis da semana, ou seja, esse quadro de emissão de monóxido de carbono é esperado para outros dias e também para outras avenidas da cidade com fluxo de veículos e características similares à Av. Tancredo Neves, como a Av. Beira Mar.

Observou-se que as plumas horária e de 8h de CO simuladas pelo AERMOD tendem a dispersar-se na direção noroeste para onde os ventos predominantes sopram, mas os picos de concentração localizam-se em torno da fonte. Isso ocorre devido ao lançamento de poluentes por veículos ocorrer próximo ao solo, pois, segundo Rodrigues (2013), a baixa altura de lançamento e a presença de construções dificulta o movimento da pluma na direção do vento.

Em relação aos receptores analisados, a partir das plumas de dispersão para o CO (1 h e 8 h), foram obtidas as seguintes concentrações máximas que atingem essas áreas, apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Concentrações máximas de CO que atingem os principais receptores

RECEPTORES	CONCENTRAÇÃO DE 1H DE CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CONCENTRAÇÃO DE 8H DE CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PADRÃO PRIM. E SEC (1H/8H)– CONAMA 03/90 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Residências	12.081	6.192	40.000 / 10.000
Hospital	6.207	3.139	
Terminal Rodoviário	12.081	6.192	
Maternidade	17.955	9.244	
Faculdade	6.207	3.139	

Fonte: O autor.

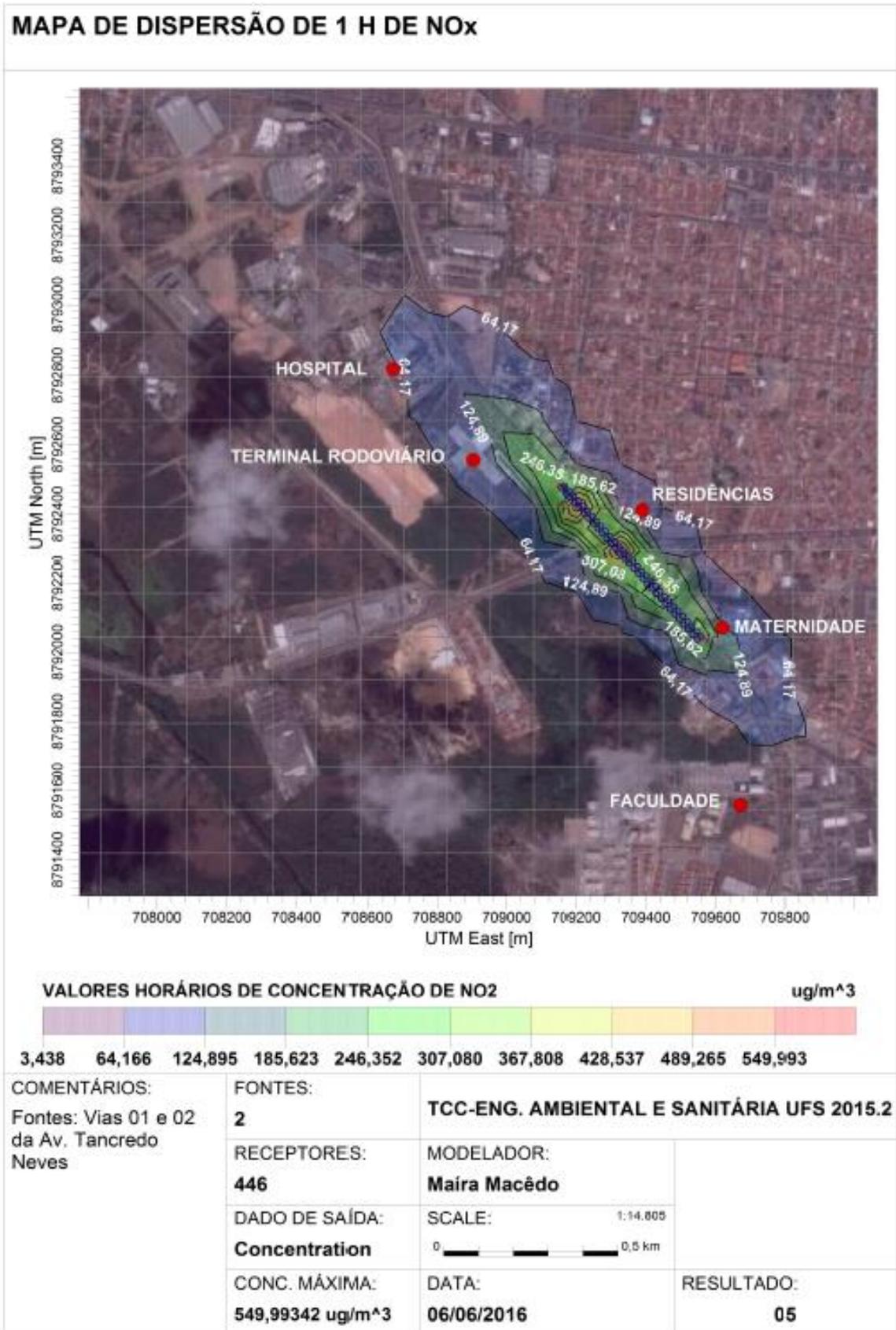
Nenhuma das concentrações de CO que atingem os receptores na modelagem realizada estão acima dos padrões de qualidade do ar do CONAMA. Como em torno da fonte concentram-se os maiores valores de CO, os receptores nas margens do trecho da avenida em estudo, como é o caso das residências e da maternidade, estão expostos aos níveis mais elevados de poluição. A faculdade e o hospital distam aproximadamente 785 m e 875 m, respectivamente, do centro das fontes, estando expostos às mais baixas concentrações de CO.

Cabe destacar que a maternidade, receptor de interesse mais próximo das vias de tráfego, no modelo encontra-se exposta a uma concentração máxima de média de 8 h de 9.244 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que corresponde a 92,44 % do padrão, ou seja, muito próximo do limite, e que as ciclovias entre as vias 01 e 02 recebem os níveis máximos de poluição, o que indica uma preocupação com os efeitos adversos sobre a população sensível que ocupa a maternidade e com os ciclistas que transitam na avenida.

4.4.3. Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

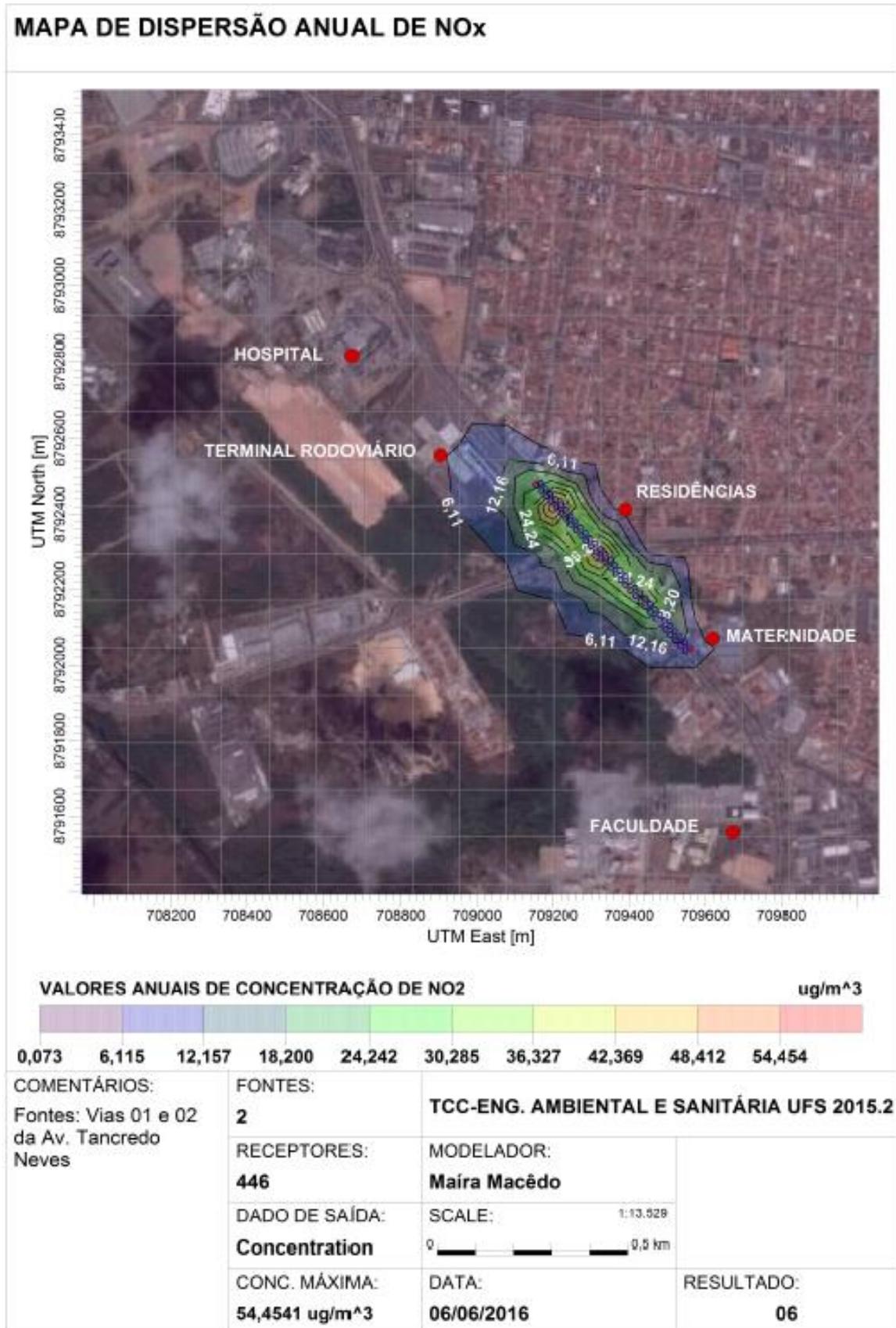
As curvas de contorno da concentração de NO_2 sobre a malha de receptores nos denominados Mapas de Dispersão são apresentadas nas Figura 24 e Figura 25.

Figura 24 - Mapa de dispersão horária de NO_x na região da Av. Tancredo Neves



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

Figura 25 - Mapa de dispersão anual de NO_x na região da Av. Tancredo Neves



Fonte: AERMOD View 6.8.6, 2016.

Os valores horários de concentração de NO_2 , obtidos no modelo de dispersão de NO_x que utilizou a conversão de NO_x em NO_2 , ultrapassaram os padrões primário e secundário de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, para NO_2 estabelecidos pelo CONAMA, sendo a concentração máxima de $550,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cerca de 2 vezes maior que o padrão primário e 3 vezes que o secundário. Por sua vez, a dispersão anual de NO_x resultou em valores de concentração de NO_2 menores e atingiu picos de concentração máxima nos centros das fontes de $54,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor menor que o limite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para média anual, ou seja, dentro dos padrões anuais de qualidade do ar, que não devem ser excedidos mais de uma vez no ano.

Resultados significativamente acima dos padrões primário e secundário eram esperados para a dispersão de NO_x , se não houvesse considerado as reações químicas que ocorrem entre esses poluentes (RODRIGUES, 2013), como fez Macedo (2012) nas modelagens da avenida Costa e Silva em Campo Grande, que resultaram em valores horários de NO_x acima de $4.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Além disso, valores altos de NO_x devem-se à emissão dos veículos pesados que são movidos a diesel, combustível fóssil mais poluente dos utilizados em veículos (SILVA et al., 2014) e os dados de tráfego da avenida em estudo mostraram um fluxo considerável de veículos pesados. No entanto, como foi considerada a conversão de NO_x em NO_2 na modelagem, os níveis resultaram em valores na ordem de grandeza dos limites da legislação para NO_2 , mas ainda assim os picos de concentração foram elevados e ultrapassaram ligeiramente os padrões horários.

Este resultado pode ser atribuído à contribuição dos veículos pesados na geração desse poluente (em torno de 200 veículos por hora na via estudada), principalmente os ônibus, por serem em maior quantidade e possuírem maior fator de emissão, do número elevado de veículos leves e motocicletas que resultaram nas maiores taxas de emissão de NO_x dentre as categorias e do fluxo horário alto de veículos na avenida.

As distribuições da pluma apresentaram-se uniformes, principalmente a da média anual, e se dispersam na direção dos ventos. Percebe-se que as maiores concentrações, inclusive as máximas, também se concentraram em torno da fonte. Isso pode ter ocorrido devido à influência das correntes de ar sobre a dispersão da pluma ser reduzida com o lançamento de poluentes a nível do solo e a presença de construções na área ao redor das vias.

A partir das plumas de dispersão para o NO_x (1 h e anual), são apresentadas na Tabela 12 as concentrações máximas de NO_2 obtidas no modelo que atingem os principais receptores considerados nessa área.

Tabela 12 – Concentrações máximas de NO₂ que atingem os principais receptores

RECEPTORES	CONCENTRAÇÃO DE 1 H DE NO _x (µg/m ³)	CONCENTRAÇÃO ANUAL DE NO _x (µg/m ³)	PADRÃO PRIMÁRIO (1 H/ANUAL)– CONAMA 03/90 (µg/m ³)	PADRÃO SECUNDÁRIO (1 H/ANUAL)– CONAMA 03/90 (µg/m ³)
Residências	124,9	6,115	320/100	190/100
Hospital	64,17	6,115		
Terminal Rodoviário	124,9	6,115		
Maternidade	185,2	6,115		
Faculdade	64,17	6,115		

Fonte: O autor.

Todos os receptores de interesse, segundo os resultados obtidos pelo modelo e apresentados no quadro acima, estão expostos a concentrações horárias dentro do padrão primário de NO_x, proveniente das vias de tráfego de veículos da Av. Tancredo Neves. Ressalta-se que a Maternidade, pela proximidade às vias, está exposta à concentração horária de NO₂ 97,5 % do padrão secundário e que as ciclovias, como localizam-se entre as duas fontes, estão expostas aos níveis horários máximos, requerendo atenção quanto ao controle da emissão de NO_x por esta avenida. A pluma de dispersão anual apresentou melhor dispersão, com curvas de concentração mais concêntricas às fontes, o que resultou em concentrações menores que atingem os principais receptores.

Sugere-se que outras modelagens de NO_x com o uso de outras opções do modelo e diferentes taxas de conversão de NO₂/NO_x devem ser feitas a fim de se ampliar o conhecimento da dispersão desse grupo de poluentes.

Como não há grandes diferenças de altitudes na área, a dispersão e a forma das plumas dos poluentes não sofreram grande influência da topografia da região, de modo que as plumas apresentaram distribuições uniformes nos modelos realizados.

5. RECOMENDAÇÕES

Para o conhecimento e controle da poluição atmosférica veicular, algumas medidas a serem tomadas pelo governo em suas esferas estadual e municipal e pelos cidadãos são recomendadas:

- Implantação de uma rede de monitoramento da qualidade do ar para que junto com predições feitas pela modelagem matemática, um diagnóstico da qualidade do ar em Aracaju-SE seja construído;
- Articulação do planejamento de uso e ocupação do solo, melhoria do sistema viário e de circulação (CETESB, 2002), distribuindo mais equitativamente a população, que reduz a densidade de algumas áreas e conseqüentes problemas de congestionamento e intenso fluxo de veículos em vias principais;
- Melhoria do sistema de transportes e de fiscalização do tráfego;
- Incentivo para maior consumo de combustíveis menos poluidores, como o álcool;
- Ampliação do sistema de transporte coletivo, que produz emissões muito menores do que os automóveis quando é considerada a relação de pessoa transportada/quilômetro (CETESB, 2002);
- Ações como rodízio de veículos para redução do fluxo de veículos em horários-pico;
- Alargamento da avenida, de maneira que afaste os receptores críticos das fontes de poluição;
- Implementação eficaz do PCPV de Sergipe, com campanhas educativas e sistema de fiscalização e de um Programa I/M (Inspeção e Manutenção), que controlaria o número de veículos deteriorados, com catalisadores com baixa eficiência, em descumprimento das normas de segurança e dos padrões de emissão estabelecidos pelo PROCONVE, o que reduziria a quantidade de fontes que contribuem significativamente na geração de poluentes.

Segundo a CETESB (2002), a gestão organizada do tráfego urbano e do sistema de transportes é determinante para a qualidade do ar nas cidades, onde a frota de veículos em circulação é grande. Portanto, é crucial a integração dos diversos órgãos de planejamento da cidade, incluindo os de trânsito, de meio ambiente, de saúde, para que se consiga reduzir o uso de veículos, aumentar a velocidade média e, assim, reduzir o consumo de combustível, a geração de poluentes e melhorar a qualidade de vida nas cidades.

Em relação à ampliação de conhecimento do tema e à realidade de Aracaju-SE, recomenda-se o desenvolvimento de estudos com outras avenidas isoladamente e em conjunto, para avaliação da poluição veicular da malha rodoviária como um todo. Ressalta-se que o AERMOD possui a opção de modelar fonte de área, função que pode ser utilizada para a modelagem da malha de vias sugerida. É de fundamental importância também a realização de estudos toxicológicos e epidemiológicos para investigar se há associações entre problemas respiratórios, que são efeitos característicos da exposição aos poluentes atmosféricos, e o tráfego de veículos nas avenidas principais da cidade. Diante desse contexto, os resultados obtidos por este estudo podem servir de base para ações governamentais preventivas e corretivas a fim de preservar a boa qualidade do ar em Aracaju-SE e conseqüentemente a qualidade de vida da população.

6. CONCLUSÕES

Diante da complexidade da poluição do ar e da dispersão de poluentes na atmosfera, este trabalho ampliou o conhecimento do tema de poluição atmosférica e uma de suas principais fontes que é o setor de transporte, sendo um dos estudos precursores na avaliação da poluição do ar de origem veicular por modelagem matemática em Aracaju-SE.

A contagem de veículos da avenida em estudo mostrou um fluxo de veículos intenso de aproximadamente 3000 veículos/h em circulação, acima do fluxo de avenidas similares em grandes metrópoles brasileiras, requerendo atenção quanto aos efeitos sobre a qualidade de vida da população, principalmente dos receptores de interesse que ficam próximos a ela, como maternidade, hospital, terminal rodoviário, faculdade e residências.

Os mapas de dispersão de PTS indicaram que as médias diária e anual para esse poluente foram muito abaixo dos padrões primário e secundário estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 03/90, em virtude da baixa emissão desse poluente pelos veículos. Já as estimativas para CO resultaram em valores máximos de concentração acima dos padrões primário e secundário da legislação, devido à alta taxa de emissão das fontes proporcional ao elevado número de veículos que circulam na avenida em estudo. Os pontos máximos concentraram-se sobre as fontes, assim como para os outros poluentes.

Os níveis máximos de NO₂ ultrapassaram os padrões primários e secundários para a média horária e foram atribuídos à contribuição dos veículos pesados na geração de NO_x e das maiores taxas de emissão pelos veículos leves e motocicletas. Já o padrão anual não foi ultrapassado. Cabe destacar que a modelagem de NO_x realizada neste trabalho foi um avanço em relação ao uso das funcionalidades do AERMOD *View*, pois considerou a opção *non-default* (OLM) de conversão de NO_x em NO₂. Sugeriu-se outras modelagens para ampliar o conhecimento da dispersão desse grupo de poluentes no ar.

A partir da rosa dos ventos, foi observado que as plumas tendem a movimentar-se na direção dos ventos predominantes de sudeste para noroeste, no entanto os poluentes e seus picos de máximo concentraram-se nas vias da avenida, devido ao lançamento de poluentes pelos veículos ser próximo ao solo, sofrendo menos influência das correntes de ar.

Em relação aos receptores de interesse, as concentrações estimadas de PTS, NO_x e CO que os atingem estavam dentro dos padrões de qualidade do ar. No entanto, cabe destacar que a Maternidade, receptor na margem direita da via 01 da avenida, encontrou-se exposta a

concentrações máximas de CO (médias 8 h e 1 h) muito próximas do máximo estabelecido na legislação, resultados que servem de alerta para a preocupação com a qualidade do ar da região e efeitos sobre os receptores sensíveis como idosos, gestantes e crianças.

O fato das curvas de maior concentração se concentrarem em torno das fontes, da área de modelagem em sua maioria ser atingida por concentrações mínimas dos poluentes e de que a dispersão da pluma ocorre na direção predominante dos ventos reforça que a cidade de Aracaju possui condições meteorológicas e topográficas que favorecem a dispersão de poluentes: topografia com ondulações suaves, altitudes baixas, baixa porcentagem de ventos calmos e atmosfera moderadamente instável.

A frota crescente de veículos na cidade, o fluxo elevado de veículos na avenida e os valores altos de concentração de CO e NO_x estimados indicam significativa contribuição da fonte móvel veicular sobre a qualidade do ar da região e alertam para a necessidade de implantação de medidas de gestão, como rede de monitoramento da qualidade do ar para diagnóstico e elaboração de inventário de fontes poluidoras, programa I/M de veículos e ações de incentivo ao uso de transporte coletivo.

Recomenda-se também a realização de outros estudos com mais avenidas para avaliação da poluição atmosférica veicular da cidade considerando toda a malha viária que contribui com a alteração da concentração de substâncias na atmosfera, de geração e dispersão dos poluentes para verificar se a situação encontrada por estas modelagens permanece nesta avenida e é característica de outras avenidas com fluxo de veículos e características similares à Av. Tancredo Neves. Além disso, estudos toxicológicos e epidemiológicos são importantes a fim de avaliar a associação entre doenças e exposição da população aracajuana a poluentes atmosféricos.

As simulações mostraram, portanto, que as condições meteorológicas e topográficas da cidade de Aracaju favorecem a dispersão de poluentes, que os veículos circulantes na avenida Tancredo Neves contribuem significativamente para as concentrações de monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio no ar e que a modelagem matemática é uma ferramenta útil para o estudo da dispersão atmosférica e a estimativa da distribuição de concentração de poluentes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. S. **Determinação de Fe, Cu, Mn, Ni, V e Ti em partículas totais em suspensão coletadas em uma área urbana da cidade de Aracaju, Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal de Sergipe, 2012.
- ÁLVARES JR., et al. **Emissões Atmosféricas**. Brasília: SENAI/DN, 2002.
- ARACAJU. PREFEITURA DE ARACAJU. **Aspectos Geográficos**. 2013. Disponível em <http://www.aracaju.se.gov.br/aracaju/?act=fixo&materia=aspectos_geograficos> Acesso em: 29/05/2016.
- ARACAJU. PREFEITURA DE ARACAJU. **Bairros Densidade**. 2007. Disponível em <<http://www.aracaju.se.gov.br/index.php?act=imprimir&codigo=30004>> Acesso em: 08/05/2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8969/85 Poluição do ar – Terminologia**. 1985.
- AUER JR., A. H. **Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies**. Journal of Applied Meteorology, v. 17, p. 636-643, 1978.
- BARBON, A. **Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com o uso do modelo AERMOD**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Ambiental) - Universidade Positivo, Curitiba, 2008. Disponível em <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp059070.pdf>>. Acesso em: 20/04/2016.
- BERTIN, M. et al. **Association between prenatal exposure to traffic-related air pollution and preterm birth in the PELAGIE mother-child cohort, Brittany, France. Does the urban-rural context matter?** Environmental Research, v. 142, p. 17-24, 2015.
- BOÇON, F. T. **Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na microescala atmosférica**. 308f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- BOUBEL et al., 2004 apud MACEDO, R. L. **Qualidade do Ar em Campo Grande/MS: Estudo das Emissões por fontes móveis e sua dispersão**. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2012.
- BRASIL. Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP). **Avaliando a qualidade da mobilidade urbana: aplicação de metodologia experimental**. Série Cadernos Técnicos, v. 23, 2015b.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Res. CONAMA N° 414 de 24 de setembro de 2009 – Comissão de Acompanhamento e Avaliação (CAP) do PROCONVE. 2012**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/1448F242/Relat_%20Proconve_Ano%202011_107RO.pdf> Acesso em: 21/05/2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 18 de 06 de maio de 1986**. Publicação no D.O.U. de 17/06/1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 05 de 15 de junho de 1989**. Publicação no D.O.U. de 30/08/89.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 418 de 28 de junho de 2009**. Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso. Publicação no D.O.U. de 26/11/2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 415 de 24 de setembro de 2009**. Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências. Publicação no D.O.U. de 25/09/2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 432 de 13 de julho de 2011**. Estabelece novas fases de controle de emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, e dá outras providências. Publicação no D.O.U. de 14/07/2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 456 de 29 de abril de 2013**. Corrige a Tabela I do Anexo da Resolução Conama n. 432, de 13 de julho de 2011. Publicação no D.O.U. de 30/04/2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 03 de 28 de junho de 1990**. Publicada no D.O.U de 22/08/90.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 08 de 06 de dezembro de 1990**. Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição. Publicada no D.O.U de 28/12/1990.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 297 de 26 de fevereiro de 2002**. Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos. Publicada no D.O.U de 15/03/2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 315 de 29 de outubro de 2002**. Publicada no D.O.U de 20/11/2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 382 de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Publicada no D.O.U de 02/01/2007.

BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). **Resolução DENATRAN Nº 452 de 26 de setembro de 2013**. Dispõe sobre os procedimentos a serem adotados pelas autoridades de trânsito e seus agentes na fiscalização das emissões de gases de escapamento de

veículos automotores de que trata o artigo 231, inciso III, do Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Disponível em <http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/Resolucao4522013.pdf> Acesso em: 20/04/2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Fontes Fixas**. 2016b. Disponível em <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/fontes-fixas> Acesso em: 21/05/2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013 – Relatório Final Ano-base 2012**. 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Qualidade do Ar**. 2016a. Disponível em <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar> Acesso em: 17/02/2016.

BRASIL. Portal Brasil. **Governo estabelece adição de 27% de etanol na gasolina**. 2015a. Disponível em <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/03/adicao-de-27-de-etanol-na-gasolina-e-estabelecida-pelo-governo> Acesso em: 23/05/2016.

CARVALHO, J.C. **Estudo dos processos de transporte e difusão na camada limite planetária utilizando os modelos RAMS e SPRAY: Aplicação ao caso do experimento TRACT**. 184 f. Tese de doutorado, IAG-USP, São Paulo, 1999.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2002**. 2002.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2014**. 2014a.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de Emissões Veiculares 2014**. 2014b.

COPPER, C. D., ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: a design approach – 4th ed**. ISBN 978-1-57766-678-X, 2011.

COSTA, L. G. et al. **Neurotoxicity of traffic-related air pollution**. Neurotoxicology, In Press, 2015.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO DE SERGIPE (DETRAN-SE). **Estatísticas. Frota de veículo por município e espécie (anual)**. 2016. Disponível em http://www.detran.se.gov.br/estat_RB00120M.asp Acesso em: 21/04/2016.

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental – 4ª edição**. ISBN 978-85-7975-046-5, 2012.

EC (European Commission). **Air**. 2016c. Disponível em http://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm Acesso em: 30/04/2016.

EC (European Commission). **Cleaner air for all. Air.** 2016a. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/air/cleaner_air/index.html> Acesso em:30/04/2016.

EC (European Commission). **Diretiva 2008/50/CE.** 2016 b. Disponível em <<http://publications.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/13ad7ff4-6d84-45a6-bfe7-bc93232559d0/language-pt/format-PDF/source-6553897>> Acesso em:30/04/2016.

FERNANDES, G. W. **Estudo da combustão de misturas Gasolina-Etanol numa máquina de compressão rápida.** Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2012.

FONSECA, V. et al. **Mapeamento sócio-ambiental como ferramenta para análise das relações espaciais: os bairros de Aracaju.** GEONORDESTE, ano XXII, n.1, 2010.

GENTNER, D. R. et al. **Elucidating secondary organic aerosol from diesel and gasoline vehicles through detailed characterization of organic carbon emissions.** PNAS, v. 109, n. 45, p. 18318-18323, 2012.

GHIO, A. J.; SMITH, C. B.; MADDEN, M. C. **Diesel exhaust particles and airway inflammation markers in diferente regions of the rat brain.** Current Opinion in Pulmonary Medicine, v. 18, p.144-150, 2012. Disponível em <<http://journals.lww.com/copulmonarymedicine/pages/articleviewer.aspx?year=2012&issue=03000&article=00010&type=abstract>> Acesso em: 17/05/2016.

GHOBADI, P., KHODAKARAMI, J. **Urban pollution and solar radiation impacts.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.57, p. 965-976, 2016.

GIRGUIS, M. S. et al. **Maternal exposure to traffic-related air pollution and birth defects in Massachusetts.** Environmental Research, v. 146, p.1-9, 2016.

GODISH, T. **Air Quality – 4th ed.** ISBN 1-56670-586-X, 2004.

GOOGLE MAPS. **Rota Av. Beira Mar 1383-1501 à Av. Beira Mar 3815 - Farolândia.** 2016. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/dir/-10.9732705,-37.0537628/-10.9571061,-37.0537299/@-10.9651665,-37.0626931,15z/data=!4m6!4m5!2m3!6e0!7e2!8j1461569340!3e0>> Acesso em: 11/05/2016.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE (HEI). **Traffic-related air pollution: A critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects.** Health Effects Institute Panel on the Health Effects of Traffic-Relates Air Pollution. Special Report, 2010. Disponível em <<http://pubs.healtheffects.org/getfile.php?u=553>> Acesso em: 17/02/2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem da População 2007.** 2016. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm>> Acesso em 08/05/2016.

JOHNSON, et al. In: STERN, A. C. **Air Pollution Third Edition – Air Pollutants, Their Transformation and Transport.** University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, North Carolina, United States, vol 1. ISBN 0-12-666601-8, 1976.

KAWANO, M. **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos**. 2003. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

KHLAIFI, A. et al. **Spatial dispersion modelling of SO₂ according to the atmospheric circulation in a coastal city: Sfax (Tunisia)**. Meteorological Applications, v.15, p. 513-522, 2008.

LAGARTENSE. Sergipe poderá adotar inspeção veicular. 2011. Disponível em <<http://lagartense.com.br/?irPara=noticias&cod=4778>> Acesso em: 21/04/2016.

LEMOS, J. F. **Poluição veicular: avaliação dos impactos e benefícios ambientais com a renovação da frota veicular leve na cidade de São Paulo**. Dissertação de Mestrado em Energia, EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MACEDO, R. L. **Qualidade do Ar em Campo Grande/MS: Estudo das Emissões por fontes móveis e sua dispersão**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2012.

MORAES et al., 2010 apud ROSA, A. F. M. **Modelagem da Concentração de Dióxido de Enxofre na Região de Cnadiota – RS utilizando o modelo AERMOD**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.1-73, 2012.

MORAES, M. R. **Ferramenta para a previsão do vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

NEW ZEALAND. National Institute of Water and Atmospheric Research/Ministry for the Environment (NIWA). **Good practice guide for atmospheric dispersion modelling**. Manatū Mō Te Taiao, Wellington, New Zealand, 2004.

OLAMO, T. H. et al. **Assessing traffic and industrial contributions to ambiente nitrogen dioxide and volatilr organic compounds in a low pollution urban environment**. Science of the Total Environment, v.529, p. 149-157, 2015.

OLIVEIRA, C. et al. **Contribuição das emissões rodoviárias na qualidade do ar da cidade de Porto**. Universidade de Aveiro.s.d.

PAZ, S. R. **Simulação numérica da atmosfera utilizando modelo digital de superfície para o estudo de dispersão de poluentes na região de Candiota-RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto Aplicado a Recursos Naturais e ao Meio Ambiente), CEPSSRM, UFRGS, 2004.

PERRY,S.G, et al. **AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study databases**. Journal of Applied Meteorology, v.44, 2005.

PRIMO, K. R. et al. **Estudo de Dispersão Atmosférica dos Óxidos de Nitrogênio (NO_x) emitidos durante a Queima do Bagaço em uma Usina de Açúcar**. Biomassa & Energia, v.2, n.1, p. 79-90, 2005.

ROSA, A. F. M. **Modelagem da Concentração de Dióxido de Enxofre na Região de Cnadiota – RS utilizando o modelo AERMOD**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.1-73, 2012.

SANTANA, E.; CUNHA, K. B.; FERREIRA, A. L.; ZAMBONI, A. **Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia**. Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEM, 2012.

SANTOS, A. R. do; VAREJÃO, A. S.; SILVA, K. G. da. **Modelagem do impacto da ampliação da Avenida Fernando Ferrari (Vitória-ES) na qualidade do ar em sua redondeza**. Sociedade & Natureza, Urbelância, ano 23, n.2, p. 249-262, 2011.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual nº 37.085 de 08 de setembro de 1997**. Regulamenta a lei nº 12.490, de 3 de outubro de 1997, que autoriza o executivo a implantar programa de restrição ao trânsito de veículos automotores no município de São Paulo. Disponível <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/decreto/1997/3708/37085/decreto-n-37085-1997-regulamenta-a-lei-n-12490-de-3-de-outubro-de-1997-que-autoriza-o-executivo-a-implantar-programa-de-restricao-ao-transito-de-veiculos-automotores-no-municipio-de-sao-paulo>> Acesso em: 20/04/2016.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual nº 59.113 de 23 de abril de 2013**. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Disponível <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>> Acesso em: 20/04/2016.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual nº 8.468 de 08 de setembro de 1976**. Aprova o Regulamento da Lei n. 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. Disponível em <http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos/legislacao/Decreto_Estadual_8468_76.pdf> Acesso em: 20/04/2016.

SEANGKIATYUTH, K. et al. **Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO₂ emissions from a cement complex**. Journal of Environmental Sciences, vol 23, n.6, pag. 931-940, 2011.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics – Second Edition**. 2006.

SERGIPE. Conselho Estadual de Meio Ambiente (CEMA). **Resolução CEMA nº 21 de 28 de junho de 2011**. Dispõe sobre a criação do Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado de Sergipe – PCPV. 2011.

SERGIPE. **Lei nº 5.858 de 22 de março de 2006**. Dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente, institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente, e dá providências correlatas. 2006.

SILVA, R. F. et al. **Diagnóstico das emissões atmosféricas de origem veicular na área urbana de Campo Mourão – PR**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, Florianópolis-SC, 2014.

STERN, A. C. **Air Pollution Third Edition – Air Pollutants, Their Transformation and Transport**. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, North Carolina, United States, vol 1. ISBN 0-12-666601-8, 1976.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Boston: Kluwer Academic Publishers. 666p, 1988. Disponível em <<http://www.springer.com/us/book/9789027727688>> Acesso em: 20/04/2016.

SU, J. G. et al. **Populations potentially exposed to traffic-related air pollution in seven world cities**. Environment International, v. 78, p. 82-89, 2015.

SYNODINOU, B. M., KAMBEZIDIS, H.D. **Atmospheric stability in Athens, Greece, during winter and summer**. Transactions on Ecology and the Environment, vol 25, WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3541, 1998. Disponível em <<http://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/ENV98/ENV98027FU.pdf>> Acesso em 20/04/2016.

SZWARCFITER, L. **Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota**. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento energético), 261 p., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

TOPOGRAPHIC-MAP.COM. **Aracaju**. 2016. Disponível em <<http://pt-br.topographic-map.com/places/Aracaju-9440338/>> Acesso em: 29/05/2016.

TURNER, D. Bruce. **Workbook of atmospheric dispersion estimates**. Cincinnati. U.S. Public Health Service, 1970.

USA. NATIONAL ARCHIVES CATALOG. **LOS ANGELES IN HEAVY SMOG, 9/1973**. 2016. Disponível em <<https://catalog.archives.gov/id/552394>> Acesso em: 30/04/2016.

USA-EPA (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**. Federal Register, v.70, n. 216, United States, 2005.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **AERMOD Implementation Guide**. United States, 2015.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **AERMOD: Description of Model Formulation**. Epa-454/r-03-004, United States, 2004.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **Automobiles and Carbon Monoxide**. United States, 1993.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **Clean Air Act Requirements and History**. 2016c. Disponível em < <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-requirements-and-history>> Acesso em: 30/04/2016.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **EPA history**. 2016b. Disponível em <<https://www.epa.gov/aboutepa/epa-history>> Acesso em: 30/04/2016.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **Fast Facts – U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2013**. United States, 2015.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust**. National Center of Environmental Assessment, Washington, DC, p. 669, 2002.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **Particle Pollution and Your Health**. United States, 2003. Disponível em: < <http://www3.epa.gov/airnow/particle/pm-color.pdf>>. Acesso em: 13/02/2016.

USA-EPA (United States Environmental Protection Agency). **Particulate Matter (PM)**. 2016a. Disponível em < <https://www3.epa.gov/pm/>> Acesso em: 30/04/2016.

VICENTINI, P. C. **Uso de modelos de qualidade do ar para a avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 e 2020 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), 224 p., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

WOODWARD, J. L. **Estimating the flammable mass of a vapor cloud**. American Institute of Chemical Engineers, 1998. Disponível online em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470935361.app1/pdf>. Acesso em: 20/04/2016.