INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Análise da dispersão de aerossóis em Cubatão-SP por meio de técnicas de
sensoriamento remoto**

IZABEL DA SILVA ANDRADE

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Tecnologia Nuclear-
Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Landolfo

**SÃO PAULO
2019**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Análise da dispersão de aerossóis em Cubatão-SP por meio de técnicas de
sensoriamento remoto**

IZABEL DA SILVA ANDRADE

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Tecnologia Nuclear-
Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Landulfo

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

SÃO PAULO
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Andrade, Izabel da S. **Análise da dispersão de aerossóis em Cubatão-SP por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2019. 116 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares — IPEN-CNEN/SP. São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Andrade, Izabel da Silva

Análise da dispersão de aerossóis em Cubatão-SP por meio de técnicas de sensoriamento remoto/ Izabel da Silva Andrade. Orientador Eduardo Landulfo. São Paulo, 2019.

116 p.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Tecnologia Nuclear. Área de concentração (Materiais) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo.

1. Sensoriamento remoto. 2. Lidar. 3. Atmosfera. 4. Aerossóis.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Izabel da Silva Andrade

Título: Análise da dispersão de aerossóis em Cubatão-SP por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr:_____

Instituição:_____ Julgamento:_____

Prof. Dr:_____

Instituição:_____ Julgamento:_____

Prof. Dr:_____

Instituição:_____ Julgamento:_____

Prof. Dr:_____

Instituição:_____ Julgamento:_____

Prof. Dr:_____

Instituição:_____ Julgamento:_____

Dedico esse trabalho aos meus amados
pais e a minha amada irmã.

Izabel Andrade

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais e minha irmã, por todo o suporte, incentivo e amor concedidos a mim em toda a vida.

Ao meu orientador dr. Eduardo Landulfo, por viabilizar este trabalho e pela confiança depositada em mim.

Ao professor Guardani pelo suporte e apoio concedidos para a realização deste trabalho.

À dr^a Renata Costa, por toda a ajuda concedida para o desenvolvimento dessa dissertação e pela amizade.

Às minhas amigas Thais, Nayara e Priscila que sempre compreenderam a minha ausência e me apoiaram em tudo.

Às "minhas meninas", Fernanda, Mare, Thais, Gigi e Elaine, que foram imprescindíveis durante esta jornada. Obrigada pelas risadas, pelo apoio, por partilharem as tristezas e as alegrias. Vocês se tornaram este caminho mais leve e fácil.

Aos amigos Gregori, Fábio, Jonatan e Antônio, pelo suporte no desenvolvimento desta dissertação e pela amizade. Vocês são pessoas incríveis, as quais levo como referência para a vida.

Aos meus professores: Regina, Roseli e Fred, por me mostrarem que o conhecimento é um caminho incrível pelo qual vale a pena lutar.

À CETESB pelo auxílio nas medidas em campo.

Por fim agradeço a *Research Centre for Gas Innovation* (projeto 9) pelo apoio financeiro.

*Estou entre aqueles que acham que a
ciência tem uma grande beleza.*

Marie Curie

RESUMO

ANDRADE, Izabel da S. Análise da dispersão de aerossóis em Cubatão-SP por meio de técnicas de sensoriamento remoto. 2019. 116 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

A cidade de Cubatão está localizada na região da baixada santista, no estado de São Paulo. Ela conta com um dos maiores complexos industriais do Brasil, tendo este iniciado as suas atividades na década de cinquenta. Cubatão, tornou-se uma grande potência econômica seguindo as tendências de seu desenvolvimento industrial. Contudo o progresso fabril aliado a ausência de políticas públicas e regulatórias, no que se refere à emissão de poluentes atmosféricos, trouxe graves consequências ambientais. A ausência de leis ocasionou um grande problema ambiental em Cubatão na década de oitenta, época na qual a região atingiu níveis altíssimos de poluição atmosférica, ganhou grande repercussão internacional e deu origem ao termo Vale da morte. Após este acontecimento, foram desenvolvidas as leis regulamentadoras de emissões atmosféricas, tanto no âmbito estadual quanto no federal. Hoje apesar de Cubatão possuir níveis mais baixos de poluição e emissões industriais controladas, é possível notar ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar. Baseado no contexto apresentado sobre o município, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo da dispersão dos poluentes na região de Cubatão-SP utilizando técnicas diversas, como: sensoriamento remoto – técnica *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e dados de satélite - e informações de qualidade do ar disponibilizados pela CETESB.

Palavras-chaves: Sensoriamento remoto, Lidar, aerossóis, dispersão.

ABSTRACT

ANDRADE, Izabel S. Analysis of the dispersion of aerosols in Cubatão-SP using remote sensing techniques. 2019. 116 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

The city of Cubatão is located in the region of the state of São Paulo. It has one of the largest industrial complexes in Brazil, having started its activities in the fifties. Cubatão, became a major economic power following the trends of its industrial development. However the factory progress, combined with the absence of public and regulatory policies, regarding the emission of atmospheric pollutants, brought serious environmental consequences. The absence of laws caused a major environmental problem in Cubatão in the eighties. The region reached very high levels of air pollution, gaining great international repercussion and giving rise to the term Death Valley. Following this event, regulatory laws about atmospheric emissions were developed, both at the state and federal levels. Today, although Cubatão has lower levels of pollution and controlled industrial emissions, it is possible to observe overcoming air quality standards. Based on the context presented on the municipality, the present work aims to conduct a study of the dispersion of pollutants in the region of Cubatão-SP using several techniques, such as: remote sensing - Light Detection and Ranging (LIDAR) and satellite data - and air quality information provided by CETESB.

Keywords: Remote sensing, Lidar, aerossol, dispersion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo three-box para o aumento do oxigênio atmosférico	21
Figura 2 - Perfil vertical de temperatura típico de regiões de latitudes médias, a qual é considerada como atmosfera padrão	22
Figura 3 - Emissões primárias, formação secundária e processamento atmosférico de aerossóis naturais e antropogênicos.....	28
Figura 4 - Esquema da distribuição de tamanho de aerossol atmosférico mostrando quatro modas	31
Figura 5 - Espalhamento elástico de Rayleigh e Mie	38
Figura 6 - Tipos de arranjo de transmissor e receptor	42
Figura 7 - Típica configuração de um sistema lidar.....	42
Figura 8 - Ilustração da geometria de um lidar.....	45
Figura 9 - Diagrama RCS.....	50
Figura 10 - Exemplo de RHI.....	50
Figura 11 - Exemplo de resultado de PPI	51
Figura 12 - Arquitetura funcional da plataforma GIOVANNI em sua versão 3	52
Figura 13 - Resumo do sistema de observação utilizado pelo MERRA	54
Figura 14 - Localização das campanhas.....	57
Figura 15 - LIDAR utilizado para a aquisição dos dados	58
Figura 16 - Lidar doppler durante aquisição de dados	60
Figura 17 - Interface do sistema QUALAR da CETESB.....	62
Figura 18 - Interface para recuperação dos dados	63
Figura 19 - Interface da plataforma GIOVANNI	64
Figura 20 - Interface da plataforma GIOVANNI para download de dados	65
Figura 21 - Cabeçalho dos dados	66
Figura 22 - Interface primária do HYSPLIT	66
Figura 23 - Interface de configuração	68
Figura 24 - Configurações para gerar a imagem.....	68
Figura 25 - Médias aritméticas anuais das estações de monitoramento de Cubatão	70
Figura 26 - Estimativas de emissão de processos industriais e queima de combustível em fontes estacionárias em Cubatão.....	71

Figura 27 - Ponto de vista do sistema lidar elástico	73
Figura 28 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 1 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016	74
Figura 29 - Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 1 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016d	75
Figura 30 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 1 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016 2016	76
Figura 31 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 2 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016	77
Figura 32 - Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 2 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016de 2016	78
Figura 33 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 2 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016	79
Figura 34 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 3 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016	80
Figura 35- Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 3 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016	81
Figura 36 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 3 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016	82
Figura 37 - Concentração média de MP10 para o dia 17/08/2016.....	83
Figura 38 - Concentração média diária para o mês de agosto/2016.....	85
Figura 39 - Velocidade dos ventos para o dia 17/08/2016	86
Figura 40 - Rosa dos ventos a 40 m e a 290 m em 17/08/2016.....	87
Figura 41 - Retrotrajetória para o dia 17/08/2016	88
Figura 42 - Trajetória para frente em 17/08/2016.....	89
Figura 43 - Média de vapor d'água precipitável para o dia 17/08/2016.....	90
Figura 44 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 1 do Vale do Mogi em 25 de agosto de 2016	91
Figura 45 - Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 1 do Vale do Mogi em 25 de agosto de 2016	92
Figura 46 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 1 do Vale do Mogi em 25 de agosto de 20161	93
Figura 47 - Concentração média de MP10 para o dia 25/08/2016.....	94
Figura 48 - Velocidade dos ventos para o dia 25/08/2016	95

Figura 49 - Rosa dos ventos a 40 m e a 290 m em 17/08/2016.....	96
Figura 50 - Retrotrajetória 25/08/2016	97
Figura 51 - Trajetória para frente em 25/08/2016.....	98
Figura 52 - Média de vapor d'água precipitável para o dia 25/08/2016.....	98
Figura 53 - Dados de RCS do canal 355 nm para os setor 1 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017	100
Figura 54 - Dados de RCS do canal 532 nm para os setor 1 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017	101
Figura 55 - Dados de RCS do canal 1064 nm para os setor 1 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017	102
Figura 56 - Dados de RCS do canal 355 nm para os setor 2 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017	103
Figura 57 - Dados de RCS do canal 532 nm para os setor 2 do Vale do Mogi em maio de 2017	104
Figura 58 - Dados de RCS do canal 1064 nm para os setor 2 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017	105
Figura 59 - Concentração média de MP ₁₀ para o dia 15/05/2017	106
Figura 60 - Concentração média diária para o mês de maio/2017.....	107
Figura 61 - Velocidade dos ventos para o dia 15/05/2017	108
Figura 62 - Retrotrajetórias para o dia 15/05/2017.....	109
Figura 63 - Trajetória para frente em 15/05/2017.....	109
Figura 64 - Média de vapor d'água precipitável para o dia 15/05/2017.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da atmosfera	21
Tabela 2 - Estimativa (em Tg por ano) para o ano 2000 de emissões diretas de partículas para a atmosfera.....	27
Tabela 3 - Estimativa (em Tg por ano) para o ano 2000 de emissões in situ de partículas para a atmosfera.....	29
Tabela 4 - Padrões de emissão da resolução CONAMA 03/90	35
Tabela 5 - Padrões de qualidade do Ar no estado de São Paulo.....	36
Tabela 6 - Critérios para episódios agudos de poluição do ar	37
Tabela 7 - Concentração de MP10 e índice de qualidade do ar em 17/08/2016 ..	84
Tabela 8 - Concentração de MP10 e índice de qualidade do ar em 25/08/2016 ..	94
Tabela 9 - Concentração de MP10 e índice de qualidade do ar em 15/05/2017	107

LISTA DE ABREVIATURAS

AIRS	<i>Atmospheric infrared sounder</i>
AMSR	<i>Advanced Microwave Scanning Radiometer</i>
Ar	Argônio
BC	<i>Black carbon</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
COS	Sulfeto de carbonila
COV	Compostos orgânicos voláteis
CS ₂	Dissulfeto de carbono
DMS	Dimetilsulfureto
FLDAS	<i>Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System</i>
GIOVANNI	<i>Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center</i>
GLDAS	<i>Global Land Data Assimilation System</i>
GPM	<i>Global Precipitation Measurement</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
H ₂	Hidrogênio (gás)
H ₂ O	Vapor d'água
H ₂ S	Ácido sulfídrico
HC	Hidrocarbonetos
He	Hélio
HYSPLIT	<i>Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model</i>
Kr	Criptônio
MERRA	<i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications</i>
MI	Meta Intermediária
MISR	<i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MOPITT	<i>Measurement of Pollution in the Troposphere</i>

MP	Material particulado
MP ₁₀	Partículas inaláveis
MP _{2,5}	Partículas inaláveis finas
N ₂	Nitrogênio (gás)
N ₂ O	Óxido nitroso
N ₂ O ₅	Pentóxido de dinitrogênio
NCA-LDAS	<i>National Climate Assessment - Land Data Assimilation System</i>
Ne	Neônio
NLDAS	<i>North American Land Data Assimilation System</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOBM	<i>NASA Ocean Biogeochemical Model</i>
NO _x	Óxidos de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OCTS	<i>Ocean Color and Temperature Scanner</i>
OM	Matéria orgânica
OMI	<i>Ozone Monitoring Instrument</i>
Pb	Chumbo
PBA	Aerossóis primários biogênicos
PF	Padrão Final
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
PRONACOP	Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PTS	Partículas totais suspensas
QUALAR	Sistema de informações da qualidade do ar
SeaWiFS	<i>Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor</i>
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₄ ⁻	Sulfato
SSMI	<i>Special Sensor Microwave Imager</i>
TOMS	<i>Total Ozone Mapping Spectrometer</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO	19
3 REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1 Atmosfera	20
3.2 Poluição	23
3.3 Aerossóis	24
3.2.1 Aerossóis primários e suas fontes	24
3.2.2 Aerossol secundário	27
3.3 Distribuição de tamanho dos aerossóis	29
3.4 Processos de Remoção e tempo de residência	32
3.5 Comportamento dos ventos em vales	33
3.6 Legislação Ambiental Federal	33
3.6.3 Legislação ambiental no estado de São Paulo	35
3.7 Efeitos da luz na atmosfera	37
3.8 Sensoriamento Remoto	39
3.8.1 Satélites	40
3.8.2 Técnica lidar	41
3.8.2.1 Equação lidar	44
3.8.2.2 Sinal RCS	49
3.9 GIOVANNI	51
3.9.1 MERRA 2	53
3.10 HYSPLIT	54
4 MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1 Caracterização de Cubatão	56
4.1.2 Coleta dos dados <i>in situ</i>	57
4.2 Lidar Elástico	58
4.3 Lidar Doppler	60
4.4 Estações de monitoramento CETESB	60
4.4.1 Dados QUALAR	61
4.5 Recuperação de dados do GIOVANNI	63
4.6 Aplicação do Hysplit	66
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
5.1 Episódio I	72

5.2 Episódio II	90
5.3 Episódio III	98
6 CONCLUSÕES	111
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

1 INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS) fora criada em 1996 e engloba nove cidades, sendo estas: Santos, São Vicente, Praia Grande, Itanhaém, Guarujá, Bertioga, Cubatão, Peruíbe e Mongaguá. Das quais duas possuem um grande destaque no âmbito econômico: Santos, por possuir um dos mais importantes complexos portuários do Brasil (EMPLASA, 2018); e Cubatão, que possui um dos maiores polos industriais da América Latina¹.

O primeiro município a ser industrializado no Brasil foi Cubatão, tal fato marca a década de 50 com rompimento da era rural para a industrial (PIRES, 2012). Aspectos como a sua proximidade ao porto de Santos e ao planalto, a abundância de água, a usina Henry Borden (facilidade para o abastecimento energético das indústrias) e a proximidade a Serra do Mar – localiza-se em um vale -, viabilizaram a escolha da cidade de Cubatão para o início da industrialização do país.

Contudo, tal desenvolvimento industrial acarretou severos problemas ambientais e de saúde na população de Cubatão no início da década de 80. Neste momento não haviam políticas que estabeleciam padrões ou limites de emissões de poluentes na atmosfera (PIRES, 2012).

Em 1983, ocorreram os episódios mais alarmantes de poluição do ar na cidade. De acordo com PIRES (2012), as emissões de material particulado alcançaram 363.000 t/ano, o que seriam padrões diários de aproximadamente 1000 t/dia. Estes são valores extremamente altos, quando comparados com os índices e os padrões de hoje segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Consequentemente, a cidade viveu constantemente com a qualidade do ar comprometida.

Após este acontecimento, foram desenvolvidas as leis regulamentadoras de emissões de poluentes atmosféricos, tanto no âmbito estadual quanto no federal². Hoje apesar de Cubatão possuir níveis mais baixos de poluição e emissões industriais controladas, é possível notar ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar. As quais podem ser observadas por meio do

¹ <http://www.cubatao.sp.gov.br/aspectos-economicos/>

² <http://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>

monitoramento das estações automáticas da CETESB que encontram-se na região.

No entanto ainda há lacunas quanto a compreensão do processo de dispersão de poluentes nesta região, visto que o melhor entendimento desta dinâmica pode auxiliar nos estudos de políticas de mitigação dos mesmos.

Devido à alta resolução temporal e espacial, sistemas de sensoriamento remoto têm sido cada vez mais utilizados em tais estudos (BOYOUK et al., 2010; WU et al., 2014), pois possibilitam a observação do deslocamento das plumas de aerossóis.

Baseado neste contexto, o monitoramento da poluição na região por meio de sistemas de sensoriamento remoto aliada as informações fornecidas pela CETESB possibilitará um estudo profundo das emissões de aerossóis na região em questão e, principalmente como estes se comportam mediante condições favoráveis para o seu confinamento.

2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é realizar um estudo da dispersão de aerossóis na região de Cubatão-SP utilizando múltiplas plataformas e técnicas, sendo estas: sensoriamento remoto (técnica lidar e dados de satélite, plataforma GIOVANNI), informações de qualidade do ar disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e a ferramenta de análise de trajetórias de massas de ar (HYSPLIT).

3 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão abordados os temas que deram suporte para o desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 Atmosfera

A atmosfera é uma das três principais partes do planeta Terra, as demais são a hidrosfera e a litosfera. Todos estes evoluíram de modo integrado. De acordo com BRAGA et al. (2005) a atmosfera sofreu diversas mudanças ao longo do período de formação do planeta, mudanças essas que só foram possíveis devido a processos biológicos e físico-químicos.

Admite-se que em seus primórdios, a atmosfera da Terra era constituída de dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e vapor de água (H_2O), com pequenas concentrações hidrogênio (H_2), algo semelhante ao que se obtém em uma erupção de vulcão hoje em dia (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Em um primeiro momento a atmosfera da Terra consistia em uma mistura química levemente redutora, enquanto que a atmosfera atual é fortemente oxidante. Evidências geoquímicas apontam para o fato de que o oxigênio atmosférico sofreu um aumento dramático na concentração por volta de 2300 milhões de anos atrás (KASTING, 1993; WALLACE e HOBBS, 2006). Na figura 1, é demonstrado o modelo *three-box*, elaborado por KASTING (1993). Tal representação mostra a evolução da atmosfera, superfície do oceano e do oceano profundo ao mesmo tempo, em 3 diferentes estágios. Nela O refere-se a condições oxidantes e R a redutoras.

Figura 1 - Modelo *three-box* para o aumento do oxigênio atmosférico

Fonte: Adaptado de KASTING, 1993.

Desse modo a constituição fundamental da atmosfera terrestre hoje baseia-se em três constituintes majoritários, Ar (Argônio), N₂ (Nitrogênio) e O₂ (oxigênio); e pequenas concentrações de outros gases. Tais valores serão ilustrados pela tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Composição da atmosfera

Constituinte	Peso molecular	Concentração fracionada em volume
Nitrogênio (N ₂)	28,013	78,08%
Oxigênio (O ₂)	32,000	20,95%
Argônio (Ar)	39,95	0,93%
Vapor d'água (H ₂ O)	18,02	0-5%
Dióxido de carbono (CO ₂)	44,01	380 ppm
Neon (Ne)	20,18	18 ppm
Hélio (He)	4,00	5 ppm
Metano (CH ₄)	16,04	1,75 ppm
Criptônio (Kr)	83,80	1 ppm
Hidrogênio (H ₂)	2,02	0,5 ppm
Oxido nitroso (N ₂ O)	56,03	0,3 ppm
Ozônio (O ₃)	48,00	0-0,1 ppm

Fonte: Adaptado de WALLACE e HOBBS, 2006.

A atmosfera terrestre é repartida em camadas, as quais possuem distintas características no que se refere a composição química e física, isto

propicia a intercorrência da sua temperatura ao longo de toda a sua extensão. A figura 2 ilustra tal comportamento (ROCHA et al., 2009).

Figura 2 - Perfil vertical de temperatura típico de regiões de latitudes médias, a qual é considerada como atmosfera padrão

Fonte: Adaptado de HOBBS e WALLACE, 2006.

Conforme SEINFELD e PANDIS (2006) a troposfera é a camada mais baixa da atmosfera, estendendo-se da superfície terrestre até a tropopausa. A sua altitude varia de 10 a 15 Km, dependendo da latitude e estação do ano. Nela ocorre a redução da temperatura de acordo com a altitude.

A estratosfera, possui um comportamento térmico inverso ao da troposfera, ou seja, conforme aumenta-se a altitude maior torna-se a temperatura. Sua extensão inicia-se na tropopausa e termina na estratopausa, tendo uma altitude de aproximadamente 45 a 55 Km (SEINFELD e PANDIS, 2006).

A camada seguinte denomina-se mesosfera, esta origina-se por volta de 80 Km e termina em 90 Km de altitude – estratopausa até a mesopausa. Neste estágio a ocorre a diminuição da temperatura conforme há o aumento de altitude (SEINFELD e PANDIS, 2006).

As camadas mais externas da atmosfera terrestre são: a estratosfera, a ionosfera e a exosfera. A primeira é a região que tem como característica as altas temperaturas, devido a absorção de comprimento de ondas curtas pelo N_2 e O_2 . Ela está localizada acima da mesopausa. A ionosfera, por sua vez é a região localizada entre a mesosfera superior e a termosfera inferior. Como seu nome

sugere nela estão presentes diversos íons, os quais são produzidos por meio de fotoionização (SEINFELD e PANDIS, 2006).

3.2 Poluição

De acordo com a *US EPA*³ a poluição do ar é caracterizada pela emissão de substâncias químicas nocivas e partículas, sejam estas emitidas por meio de atividades humanas ou por processos da natureza, em concentrações que possam prejudicar a saúde do ser humano e transcorrer problemas ao meio ambiente. As substâncias que causam este efeito, são denominadas poluentes, os quais podem ser definidos como:

“[...]Entende-se como poluente atmosférico 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:

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.” (BRASIL, 1990)

A classificação dos poluentes atmosféricos pode transcorrer por meio da sua origem, estado físico e da sua classe química. No que tange a origem, estes podem ser classificados como primários e secundários. Desse modo, os primários consistem nos que são emitidos diretamente da fonte para a atmosfera, enquanto que os secundários são formados na atmosfera devido as condições químicas favoráveis (ALMEIDA, 1999).

A classificação quanto a classe química dá-se por meio de orgânicos e inorgânicos. Já a classificação que se refere ao seu estado físico é dividida em três grupos: material particulado, gases e vapores (ALMEIDA, 1999).

Entre os poluentes existentes, destacam-se o monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), ozônio (O₃), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). Todos estes são de origem antrópica, ou seja, sua fonte emissora são processos humanos, como: queima de combustível fóssil, quer este por meio da utilização deste em veículos leves e pesados, ou devido a sua aplicação na indústria. O ozônio neste caso é uma

³ <http://www.epa.ie/footer/a-zglossaryofenvironmentalterms/#A>

exceção, pois, trata-se de um poluente secundário, que depende da presença de hidrocarbonetos, de óxidos de nitrogênio e de luz solar para formar-se (MEDEIROS, 2005).

3.3 Aerossóis

De acordo com FINLAYSON-PITTS e PITTS (2000) os aerossóis consistem em partículas líquidas ou sólidas em suspensão em um gás. Desse modo estes diferem-se do material particulado, pois, o termo aerossol inclui tanto as partículas como o gás no qual estas se encontram em suspensão. Entretanto, é possível notar que tal termo é aplicado apenas para partículas.

Tais partículas interagem de maneiras diferentes com a radiação solar, podendo ser descritas como: absorvedoras e refletoras. Os aerossóis absorvedores têm a capacidade de absorver uma porção da energia emitida do Sol para a Terra. Já os refletores, conseguem refletir uma parte dessa energia (JACOB,1999).

Ambos causam efeitos indiretos e diretos sobre o nosso planeta. O maior efeito direto é a interferência no clima terrestre. Isto ocorre devido ao fato de que as partículas absorvedoras (retêm energia na forma de calor) contribuem para o aquecimento do planeta, e as refletoras (emitem parte da radiação recebida) podem provocar um efeito de resfriamento. Quanto aos efeitos indiretos podemos citar que alguns tipos de aerossóis servem como núcleo de condensação de nuvens (JACOB,1999).

As fontes de aerossóis podem ser de origem antrópica (provenientes da ação humana, como a queima de combustíveis, emissão industrial, queimadas) ou de origem natural (erupções vulcânicas, sal marinho e material biológico) (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Conforme a fonte emissora e os processos de formação desses aerossóis, podemos classificá-los como: primários e secundários. Os aerossóis primários são emitidos diretamente para a atmosfera, ou seja, não sofrem processos diversos para se formarem na atmosfera. Já os secundários são aerossóis formados na atmosfera, por diversos processos químicos e físicos.

3.2.1 Aerossóis primários e suas fontes

Conforme JACOBSON (2002), os aerossóis primários possuem uma composição variada, pois estes podem originar-se de dois modos: naturalmente ou produzido por algum processo humano.

A relação entre a emissão global de partículas na atmosfera a partir de atividades antrópicas é de 20% (em massa) superior as que são provenientes de fontes naturais. As principais fontes antrópicas de aerossóis são processos industriais, queima de biomassa, erosão eólica de terras cultivadas, queima de combustível e poeira das estradas (WALLACE e HOBBS, 2006).

Uma das fontes de emissões de aerossóis biológica é a transferência de partículas da superfície da Terra para a atmosfera, a qual é provocada pela ação dos ventos e da turbulência atmosférica. Para que esta ação ocorra, a velocidade do vento na superfície precisa exceder valores limiares, os quais são dependentes do tamanho da partícula e do tipo da superfície. Pode-se chamar esta emissão de poeira de solo, isto é, o tamanho das partículas bem como a sua composição podem sofrer mudanças decorrentes ao tipo de solo presente na região. Ressalta-se que este tipo de aerossol pode ser transportado a longas distâncias (JACOBSON, 2002; WALLACE e HOBBS, 2006).

As erupções vulcânicas introduzem na atmosfera partículas e gases. As partículas grandes expelidas têm tempos de residência menores na atmosfera, mas as partículas pequenas (oriundas principalmente pela conversão gás-partículas de SO₂) se estas alcançarem altitudes mais elevadas na atmosfera, pode ocorrer o transporte em escala global (WALLACE e HOBBS, 2006).

As partículas de aerossol naturais mais abundantes na atmosfera em termos de massa são as gotas provenientes dos oceanos - *spray* marinho- tornando assim os oceanos a maior fonte emissora biológica de aerossóis (JACOBSON, 2002). O principal mecanismo de ejeção de materiais oceânicos para o ar é o estouro da bolha (*bubble bursting*). Assim os aerossóis compostos de sal marinho se originam de gotículas ejetadas no ar quando as bolhas explodem na superfície do oceano (WALLACE e HOBBS, 2006).

Segundo PÖSCHL e SHIRAIWA (2015) os aerossóis biológicos podem ser considerados como uma ampliação da interação atmosfera-biosfera e desenvolvem um papel indispensável no sistema terrestre. Estas partículas são denominadas aerossóis biológicos primários (PBA), ou bioaerossóis, e são

liberados diretamente da biosfera para a atmosfera. Nelas são englobadas as células, bactérias, esporos de fungos, vírus, pólen, detritos de plantas, etc.

Os aerossóis biológicos primários são importantes para a manutenção de ecossistemas e biomas, pois, estes são essenciais para a reprodução biológica e disseminação de muitos organismos. A dispersão de alérgenos e patógenos de seres vivos pode gerar implicações importantes para diversas áreas, desde a agricultura até questões de saúde pública (PÖSCHL & SHIRAIWA, 2015).

Além disso, os bioaerossóis podem servir como núcleos para a formação de gotas de nuvens, cristais de gelo e precipitação, influenciando no ciclo hidrológico sobretudo em regiões em que não ocorra influência de atividades antrópicas. Assim presume-se que os bioaerossóis nestas regiões tenham um papel fundamental na formação de nuvens e por consequência no ciclo hidrológico, isto é nas chuvas. Desse modo desenvolvem um papel importante para a conservação do clima e da vida (PÖSCHL & SHIRAIWA, 2015).

A queima de biomassa, por sua vez é composta pela queima de florestas, pastagens e terras agrícolas. Os incêndios de biomassa são responsáveis por uma grande parte das emissões de partículas. Tais incêndios podem ser de origem natural ou antrópica. Os aerossóis provenientes desta fonte tendem a ser pequenas partículas com presença majoritária de compostos orgânicos e carbono elementar (JACOBSON, 2002; WALLACE e HOBBS, 2006).

A queima de combustíveis fósseis é uma fonte exclusivamente antrópica. As principais partículas emitidas por esta fonte são: fuligem, matéria orgânica, sulfato (SO_4), metais e cinzas. Enquadram-se neste tipo de aerossóis as emissões industriais que por sua vez emitem aerossóis através de processos de combustão de material fóssil, sendo o carvão, a gasolina e o diesel os produtos mais utilizados, assim contribuindo com a maior parte das emissões por queima de combustíveis fósseis (JACOBSON, 2002).

A tabela 2, desenvolvida por WALLACE e HOBBS (2006) demonstra a magnitude das emissões diretas dos aerossóis citados previamente.

Tabela 2 - Estimativa (em Tg por ano) para o ano 2000 de emissões diretas de partículas para a atmosfera

	Hemisfério Norte	Hemisfério Sul
Aerossóis carbonáceos		
Matéria orgânica (0 - 2 μm)		
Queima de biomassa	28	26
Combustível fóssil	28	0.4
Biogênico (> 1 μm)	-	-
Black Carbon (0 - 2 μm)		
Queima de biomassa	2.9	2.7
Combustível fóssil	6.5	0.1
Aeronave	0.005	0.0004
Poeira industrial, etc (> 1 μm)		
Sal marinho		
< 1 μm	23	31
1 - 16 μm	1.420	1870
Total	1.440	1.900
Poeira mineral (solo)		
< 1 μm	90	17
1-2 μm	240	50
2 - 20 μm	1.470	282
Total	1800	349

Fonte: Adaptado de WALLACE e HOBBS, 2006.

3.2.2 Aerossol secundário

Aerossóis secundários são aqueles que são concebidos por intermédio de reações químicas, fotoquímicas, coagulação de moléculas, processos gás-partícula, nucleação homogênea e heterogênea, devido a presença de gases e partículas na atmosfera (ALVES, 2005). Dentre todos os processos de formação de aerossóis secundários, são evidenciados dois: o processo gás partícula e a coagulação. A figura 3, ilustra o ciclo e os processos de formação deste tipo de aerossóis.

Figura 3 - Emissões primárias, formação secundária e processamento atmosférico de aerossóis naturais e antropogênicos

Fonte: FUZZI et al., 2006; PÖSCHL, 2005; Adaptado de MONKS et al., 2009.

A coagulação pode ocorrer entre duas partículas de diferentes tamanhos, podendo ter colisão entre pequenas, entre uma partícula pequena e uma grande, ou entre duas partículas grandes. Os mecanismos essenciais que permitem que as partículas colidam são: o movimento browniano, o aprimoramento do movimento browniano devido à convecção, a coleta gravitacional, o movimento inercial turbulento e o cisalhamento turbulento (JACOBSON, 2002).

Segundo WALLACE e HOBBS (2006) a conversão de gás para partícula (g para p) é um processo relevante para a atmosfera. Em tal processo pode ocorrer a condensação dos gases para a formação de novas partículas, bem como a condensação de gases em partículas previamente existentes. O segundo meio é beneficiado quando a superfície das partículas forem maiores e a supersaturação dos gases for baixa. Já o primeiro, a formação de novas partículas, geram partículas com o diâmetro menor que 0,01 μm . Quando comparadas as quantidades de aerossóis emitidos de forma natural e direta, os aerossóis provenientes do processo gás para partícula chegam a valores semelhantes. Na tabela 3 são apresentados as estimativas de emissões *in situ*.

Para o processo de formação de aerossóis secundários, em especial aos resultantes do processo gás para partícula, existem algumas classificações como: enxofre, nitrogênio, materiais orgânicos e carbonáceos. Os gases de enxofre (como: H_2S , CS_2 , COS , DMS) podem ser oxidados a SO_2 . O SO_2 pode ser oxidado

a sulfato (SO_2^{4-}), por meio de reações na fase gasosa (homogêneas). Entretanto, em escala global, as reações heterogêneas de SO_2 na água presente em nuvens dominam a conversão do SO_2 (ALVES, 2005; WALLACE e HOBBS, 2006).

Os oceanos contribuem de maneira significativa para o crescimento dos aerossóis existentes, em virtude dos sulfatos procedentes do dimetilsulfureto (DMS). Sulfatos também são produzidos dentro e ao redor das nuvens, e o ácido nítrico pode se formar a partir do N_2O_5 na água da nuvem. A evaporação subsequente da água da nuvem libera essas partículas de sulfato e nitrato no ar. (WALLACE e HOBBS, 2006).

Os aerossóis orgânicos e carbonosos são produzidos pela conversão de gás para partículas pelos gases liberados da biosfera e por compostos voláteis (COV) como o petróleo bruto que vaza para a superfície da Terra (WALLACE e HOBBS, 2006).

Tabela 3 - Estimativa (em Tg por ano) para o ano 2000 de emissões in situ de partículas para a atmosfera

	Hemisfério Norte	Hemisfério sul
Sulfatos (como NH_4HSO_4)	145	55
Antropogênico	106	15
Biogênico	25	32
Vulcânica	14	7
Nitrato (como NO_3^-)		
Antropogênico	12,4	1,8
Natural	2,2	1,7
Compostos orgânicos		
Antropogênico	0,15	0,45
Biogênico	8,2	7,4

Fonte: Adaptado de WALLACE e HOBBS, 2006.

3.3 Distribuição de tamanho dos aerossóis

De acordo com SEINFELD e PANDIS (2006), os aerossóis são partículas que possuem tamanhos variados, de modo que na literatura nomeia-se o tamanho como diâmetro, o qual varia de alguns Angströms ($\text{\AA}$) a vários

micrometros (μm). Em geral as partículas são divididas em duas grandes classes: a moda fina, que abrange as partículas que possuem um diâmetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$ e a moda grossa, na qual enquadram-se as partículas que possuem diâmetro maior que $2,5 \mu\text{m}$. A figura 4, consiste em um esquema concebido por FINLAYSON-PITTS e PITTS (2000), o qual demonstra tal divisão e os processos envolvidos, desde a emissão até a deposição das partículas.

As modas de partículas finas e grossas, diferem-se em diversos aspectos, como por exemplo: fontes emissoras, processos de transformação na atmosfera, composição química, modo como adentram no sistema respiratório e por consequência como afetam a saúde, os processos de remoção e propriedades ópticas (SEINFELD e PANDIS, 2006).

As partículas que estão na moda grossa (diâmetro $> 2,5 \mu\text{m}$) comumente são geradas por processos mecânicos, como: erosão e moagem, assim podem ser descritas como partículas de poeira tanto de origem antrópica quanto de origem natural (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000; SEINFELD e PANDIS, 2006).

Por serem particular maiores, estas tendem a ter um tempo de vida curto na atmosfera, uma vez que possuem velocidade de sedimentação suficiente para depositarem-se sozinhas na superfície do planeta. Ressalta-se que o transporte destas a longas distâncias ocorre somente mediante processos convectivos e que a sua permanência por um tempo maior na atmosfera sucede na presença de vento (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

Conforme observado no esquema abaixo, é possível notar que as partículas finas possuem subdivisões, sendo estas: partículas ultrafinas, núcleo de Aitken (ou núcleos transitórios) e acumulação.

As partículas ultrafinas, como a maioria dos aerossóis pertencentes a moda fina, é originado por processos físicos e químicos na atmosfera. Os diâmetros das partículas variam de $0,001 \mu\text{m}$ até $0,01 \mu\text{m}$, deste modo são consideradas partículas muito pequenas (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

Figura 4 - Esquema da distribuição de tamanho de aerossol atmosférico mostrando quatro modas

Fonte: Adaptado de FINLAYSON- PITTS e PITTS, 2000.

As partículas que encontram-se no núcleo de Aitken, são aquelas que possuem um diâmetro entre 0,01 μm a 0,1 μm . Elas normalmente são formadas a partir da condensação de vapores quentes emitidos pelos processos de combustão e também pela nucleação de outros compostos e materiais presentes na atmosfera (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Por fim tem-se a moda de acumulação, a qual são pertencentes as partículas que possuem um diâmetro que abrange de 0,1 a 2,5 μm . As maiores fontes de partículas dessa moda são a coagulação de partículas de núcleo de

Aitken, bem como a condensação de vapores em partículas existentes, viabilizando desse modo o aumento destas. Nomeia-se como acumulação, pois, os processos de remoção não são tão eficientes, fazendo com que as partículas acumulem-se nesta região (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

3.4 Processos de Remoção e tempo de residência

As partículas são removidas da atmosfera por diferentes mecanismos, sendo estes: sedimentação, deposição seca e precipitação. A sedimentação consiste na deposição de partículas sobre a superfície com base na sua massa, ou seja, partículas com diâmetros maiores ou iguais a 20 μm tendem a ter uma remoção mais eficaz por este processo. O tempo de residência desta partícula na atmosfera é inferior a 1 dia. Tendo em vista que quanto maior o diâmetro mais pesadas serão as partículas, pode-se dizer que este processo depende apenas da gravidade e da massa da partícula (JACOBSON, 2002; WALLACE e HOBBS, 2006).

A deposição seca é o processo no qual as partículas são transportadas por difusão molecular, difusão turbulenta ou advecção, para superfícies oceânicas, edifícios, árvores entre outras superfícies. Em seguida ligam-se a outras partículas ou reagem com a superfície (JACOBSON, 2002).

Diferentemente das partículas maiores, partículas que possuem um diâmetro entre 0,2 e 2 μm possuem muitas fontes, porém poucos sorvedouros. Desta maneira essas partículas têm um maior tempo de residência na atmosfera. Este tempo pode ser reduzido pela precipitação (*rainout*) ou pela impactação, causando a redução do tempo de permanência dessas partículas em alguns dias (WALLACE e HOBBS, 2006).

O *rainout* é descrito por JACOBSON (2002) como o processo pelo qual as partículas de aerossol se fundem com gotas de chuva e, depois chegam à superfície na forma de chuva. Este é um processo muito importante quando se trata da remoção de partículas. Isto se dá devido ao fato de que as nuvens de chuva ocorrem apenas na troposfera, sendo assim tal processo de remoção é feito apenas na baixa atmosfera, ou seja, a região mais próxima a litosfera.

3.5 Comportamento dos ventos em vales

Segundo WHITEMAN (2000) é difícil observar qualquer componente do sistema de ventos pertencentes a uma montanha, devido à variedade de tais. Constituem este sistema os ventos em declive, ventos ao longo do vale, ventos entre vales ou montanha. Além disso os ventos em montanhas sofrem perturbações de fluxos de maior escala, entretanto cada componente pode ser afetado pelos demais.

Ademais, os fluxos provenientes das encostas são muitas vezes controlados pelos fluxos um pouco mais fortes e mais profundos ao longo do vale. Geralmente os fluxos de ventos entre vales são fracos e também interagem com os fluxos ao longo do vale, resultando em uma circulação helicoidal paralela ao eixo do vale e no fluxo de subida reforçado sobre a parede lateral mais quente (WHITEMAN, 2000).

Os ventos de planície - montanha, que por sua vez não são confinados pela topografia, são frequentemente influenciados por fluxos em escala sinótica. Dessa maneira eles variam mais de um dia para o outro do que os ventos dentro de um vale (WHITEMAN, 2000).

No caso de Montanha os fluxos simples são geralmente tão fracos que são difíceis de detectar em dias individuais, devido à variabilidade do fluxo sinótico. A força e a direção do fluxo devem ser determinadas climatologicamente por meio da análise de muitos eventos (WHITEMAN, 2000).

Alguns dos regimes de ventos citados acima são encontrados com maior facilidade na literatura, enquanto outros ainda necessitam de um estudo mais profundo, uma vez que todos interferem na dispersão da poluição.

3.6 Legislação Ambiental Federal

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 5, de 15 de junho de 1989, estabelece o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). Este programa tem como objetivo ser uma ferramenta para a gestão ambiental proporcionando o bem estar da sociedade e do meio ambiente (BRASIL, 1989).

Nela são descritas estratégias, dentre as quais sobressaem-se o monitoramento da qualidade do ar e a adoção de padrões nacionais de qualidade do ar, bem como os instrumentos que auxiliam o seu cumprimento, dentre os quais encontram-se outras leis como o Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE) e o Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial (PRONACOP) (BRASIL, 1989).

Para complementar a resolução nº5, fora publicada a resolução CONAMA nº 3 em 28 de junho de 1990, implementando padrões de qualidade do ar. Nesta são definidos todos os termos que cabem a qualidade do ar. Estando em seu primeiro artigo as definições dos mesmos, as quais são concentrações de poluentes atmosféricos, que quando excedidas causam danos ao meio ambiente e ao bem estar da população (BRASIL, 1990).

Dentre as terminologias presentes na resolução CONAMA Nº3/90 encontra-se no artigo 2º a definição de padrões primários e secundários. Sendo assim, quando extrapoladas as concentrações de algum poluente e estas causarem algum dano à saúde, serão considerados padrões primários. Já os padrões secundários consistem em concentrações mínimas que podem causar efeitos prejudiciais ao bem estar da população (BRASIL, 1990).

Os valores dos padrões primários e secundários previstos na resolução nº 3 do CONAMA, foram dispostos na tabela a seguir, para uma melhor observação e interpretação dos mesmos. Os valores para 24h consistem em concentrações médias em quanto que os padrões anuais variam entre médias geométricas e aritméticas, estas encontram-se discriminadas na tabela 4.

Ressalta-se que as concentrações dos padrões primário e secundário, para o período de 24 h, não devem ser excedidas mais de uma vez por ano.

Tabela 4 - Padrões de emissão da resolução CONAMA 03/90

Poluente	Padrão primário		Padrão secundário	
	Anual	24h	Anual	24h
Partículas totais suspensas (PTS)	⁴ 80 µg.m ⁻³	240 µg.m ⁻³	⁴ 60 µg.m ⁻³	150 µg.m ⁻³
Fumaça (FMC)	⁵ 60 µg.m ⁻³	150 µg.m ⁻³	40 µg.m ⁻³	100 µg.m ⁻³
Partículas inaláveis	50 µg.m ⁻³	150 µg.m ⁻³	50 µg.m ⁻³	150 µg.m ⁻³
Dióxido de enxofre ⁶ (SO ₂)	80 µg.m ⁻³	356 µg.m ⁻³	40 µg.m ⁻³	100 µg.m ⁻³
Monóxido de carbono (CO)	9 ppm	35 ppm	9 ppm	35 ppm
Ozônio ⁷	-	160 µg.m ⁻³	-	160 µg.m ⁻³
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	100 µg.m ⁻³	320 µg.m ⁻³	100 µg.m ⁻³	190 µg.m ⁻³

Fonte: Resolução CONAMA 03/90

3.6.3 Legislação ambiental no estado de São Paulo

Os padrões da qualidade do ar no estado de São Paulo foram estabelecidos no ano de 1976, pelo decreto estadual nº 8468/76, que posteriormente foi aperfeiçoado pelo decreto nº 59113/2013. Nele estão descritos todos os padrões e critérios adotados pela CETESB para estabelecer a qualidade do ar. Dentre os quais encontram-se as Metas Intermediárias (MI) e os Padrões Finais (PF).

As metas intermediárias (MI) estão divididas em 3 etapas, sendo cada uma delas com valores inferiores a anterior. Elas visam a redução de valores de emissões afim de atingir as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), as quais estão intituladas como padrões finais na legislação da CETESB.

A Meta intermediária Etapa 1 (MI1) está em vigência no estado de São Paulo desde 24 de abril de 2013, quando fora publicado o decreto nº 59113 no diário oficial. As concentrações estabelecidas na Meta Intermediária Etapa 2 (MI2) entrarão em vigor mediante as avaliações realizadas na Etapa 1 por meio de estudos técnicos efetuados pelo órgão estadual ambiental bem como a validação

⁴ Média Geométrica Anual

⁵ Média Aritmética Anual

⁶ Tempo de amostragem difere-se dos demais, obtendo-se uma média a cada 8h e a cada 1h.

⁷ Limites de concentrações para o período de 1h.

destes pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) (ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

A Meta Intermediária Etapa 3 (MI3) estabelece as concentrações dos poluentes atmosféricos a serem respeitadas, assim que encerrar-se o período de vigência da MI2. Assim como a MI2, esta somente tornara-se válida após os estudos realizados sobre a meta intermediária anterior (ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

Os padrões finais serão aplicados em sua maioria após o cumprimento da MI3, no entanto, alguns poluentes não possuem valores nas metas intermediárias, adotando assim os valores de concentração dos padrões finais. Este é o caso do monóxido de carbono (CO), chumbo (Pb) e partículas totais em suspensão (PTS). A tabela 5, exibe os poluentes e por conseguinte as suas respectivas concentrações para cada uma das MI e PF.

Tabela 5 - Padrões de qualidade do Ar no estado de São Paulo

Poluente	Tempo de Amostragem	MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas inaláveis (MP ₁₀)	24 horas MAA ⁸	120 40	100 35	75 30	50 20
Partículas inaláveis finas (MP _{2,5})	24 horas MAA ⁸	60 20	50 17	37 15	25 10
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas MAA ⁸	60 40	40 30	30 20	20 –
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora MAA ⁸	260 60	240 50	220 45	200 40
Ozônio (O ₃)	8 horas	140	130	120	100
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	–	–	–	9 ppm
Fumaça* (FMC)	24 horas MAA ⁸	120 40	100 35	75 30	50 20
Partículas totais em suspensão* (PTS)	24 horas MGA ⁹	– –	– –	– –	240 80
Chumbo** (Pb)	MAA ⁸	–	–	–	0,5

Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>

⁸ Média Aritmética Anual

⁹ Média Geométrica Anual

* Parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB.

** Será monitorado apenas em áreas específicas, a critério da CETESB.

Na resolução nº 59113/2013 fora instaurado um plano de emergência em caso de episódios críticos de poluição do ar, este tem como objetivo realizar ações preventivas entre os governos estaduais, municipais, com a cooperação também de entidades privadas e da comunidade, com o objetivo de restringir ao máximo os efeitos adversos da poluição do ar na saúde da população.

Para que o plano de emergência possa ser executado, foram estabelecidas três classificações: nível de atenção, de alerta e de emergência. Para cada um dos três níveis são consideradas as concentrações específicas para estes parâmetros: dióxido de enxofre (SO₂), material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e ozônio (O₃). Também são avaliadas as condições meteorológicas e os fatores adversos. Os valores encontram-se dispostos na tabela 6 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

Tabela 6 - Critérios para episódios agudos de poluição do ar

Parâmetro	Tempo de amostragem	Atenção	Alerta	Emergência
MP _{2,5}	24 h	125 µg/m ³	210 µg/m ³	250 µg/m ³
MP ₂₀	24 h	250 µg/m ³	420 µg/m ³	500 µg/m ³
Dióxido de enxofre	24 h	800 µg/m ³	1.600 µg/m ³	2.100 µg/m ³
Dióxido de nitrogênio	1 h	1.130 µg/m ³	2.260 µg/m ³	3.000 µg/m ³
Monóxido de carbono	8 h	15 ppm	30 ppm	40 ppm
Ozônio	8 h	200 µg/m ³	400 µg/m ³	600 µg/m ³

Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>

3.7 Efeitos da luz na atmosfera

Dois processos de interação energia-matéria são importantes para a manutenção da vida em nosso planeta: a absorção e o espalhamento. Ambos

ocorrem na atmosfera, por meio da interação da radiação com as moléculas e com as partículas presentes nela. Cada uma destas ações é linearmente proporcional a três itens: a intensidade da radiação em dado ponto ao longo do caminho do raio, a concentração local dos gases e partículas responsáveis pela absorção e espalhamento e a eficácia da absorção e do espalhamento destes elementos (WALLACE e HOBBS, 2006). A figura 5 ilustra todos os tipos de interação entre partícula e radiação.

Figura 5 – Interação entre partícula e radiação

Fonte: Adaptado de SEINFELD e PANDIS, 2006.

O espalhamento acontece quando moléculas de gases ou partículas interagem com a radiação eletromagnética e fazem com que esta mude sua trajetória ao longo da atmosfera. Esse fenômeno depende de diversos fatores, como por exemplo: o comprimento de onda da radiação, a quantidade de partículas ou gases e a distância percorrida pela radiação. No que refere-se ao espalhamento existem três tipos, contudo, serão abordados apenas o espalhamento Mie e Rayleigh (LEVIN, 1999).

Pode-se definir o espalhamento Rayleigh como aquele ocorre quando as partículas são muito pequenas quando comparadas ao comprimento de onda da radiação. Pequenas partículas de poeira, moléculas de nitrogênio e oxigênio, são

exemplos de elementos que ao interagirem com a radiação produzem o espalhamento Rayleigh. Este tipo de espalhamento é predominante na atmosfera superior, sendo responsável pela cor azul do céu (WEITKAMP, 2005; LEVIN, 1999).

O espalhamento Mie ocorre quando a relação do comprimento de onda da radiação e da partícula são próximos, ou seja, estes possuem quase o mesmo tamanho. Esse espalhamento é comumente causado por: poeira, pólen, fumaça e vapor d'água. Ele tende a atingir comprimentos de onda maiores do que os afetados pelo espalhamento Rayleigh. Tal espalhamento ocorre sobretudo nas regiões mais baixas da atmosfera, onde há maior profusão de partículas grandes (LEVIN, 1999).

Além do espalhamento, outro efeito que ocorre quando há interação entre a radiação eletromagnética com a atmosfera, é o que chamamos de absorção. Diferente do espalhamento, a absorção faz com que moléculas e partículas absorvam energia em diversos comprimentos de onda. As moléculas mais afetadas por este efeito são as de ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono (LEVIN, 1999).

3.8 Sensoriamento Remoto

De um modo genérico pode-se definir o sensoriamento remoto como um método para medir e adquirir informações de um fenômeno ou de um objeto, por intermédio de um dispositivo que não tenha contato direto com o mesmo. Como exemplos de dispositivos pode-se citar: câmeras, lasers e receptores de rádio frequência, radares, sonares, sismógrafos, gravímetros, entre outros (LEVIN, 1999).

As aplicações do sensoriamento remoto são diversas, entre elas pode-se destacar o mapeamento, monitoramento ou levantamento de informações sobre: agricultura, florestas, estudo de solos, recursos hídricos, meio ambiente, geologia, entre outros (FIGUEIREDO, 2005).

Os métodos de sensoriamento remoto podem ser classificados em passivo ou ativo. O primeiro trata-se de um sistema que capta e registra a energia irradiada naturalmente ou refletida por um objeto, tendo como principal fonte de energia a fonte natural, ou seja, o Sol.

Enquanto que o sistema ativo, fornece a sua própria fonte de energia, a qual é direcionada para o objeto de estudo, para que se possa medir a energia retornada (LEVIN, 1999; FIGUEIREDO, 2005).

3.8.1 Satélites

O sensoriamento remoto pode ser realizado por instrumentos que estejam ou não afixados ao solo, desse modo podem ser alocados, por exemplo, em meios de transporte, permitindo a realização de monitoramento da atmosfera com uma maior amplitude, não apenas em escala regional (LOPES, 2011).

Atualmente instrumentos deste tipo encontram-se a bordo de satélites, o que traz grandes vantagens como o monitoramento atmosférico em escala global e a viabilização de estudos em áreas onde não existam e/ou seja difícil a instalação de um sistema fixo ao solo.

Os satélites podem ser classificados como: geoestacionários, com órbita polar, com órbita em alta e baixa inclinação. Para os fins da presente pesquisa serão abordados apenas os dois primeiros.

Os geoestacionários podem orbitar em grandes altitudes, por volta de 36000 km. Eles possuem este nome devido ao fato de sempre observarem a mesma região do globo terrestre. Desse modo, proporcionam observações a respeito da atmosfera em uma localidade específica (LOPES, 2011).

Os satélites com órbita polar giram em volta do planeta no sentido Norte-Sul. Aliado ao movimento de rotação da Terra, ou seja, a volta que o planeta dá em seu próprio eixo. Este tipo de satélite efetua a cobertura completa do globo terrestre em um determinado intervalo de tempo. Normalmente, este tipo de satélite encontra-se sincronizado com o Sol, assim realiza medidas no mesmo horário do dia em uma área específica do planeta (LOPES, 2011; LEVIN, 1999).

3.8.2 Técnica lidar

Lidar, é o acrônimo de *Ligth Detection and Ranging*. Esta técnica possui diversas aplicações, as quais variam desde as ciências atmosféricas até a arqueologia¹⁰.

Nas últimas décadas, este equipamento assumiu um papel fundamental no âmbito das pesquisas atmosféricas, devido à alta resolução espacial e temporal de suas medições. Além disso, dependendo do traçador utilizado, existe a possibilidade de observações da atmosfera em variadas condições climáticas, bem como em faixas de altura que variam desde o solo até 100 Km (WEITKAMP, 2005).

Os diferentes tipos de sistema lidar estão relacionados aos traçadores utilizados por cada um, assim tem-se: lidar elástico, Raman, Doppler, de absorção diferencial e de fluorescência (WEITKAMP, 2005). Neste trabalho será abordado o lidar do tipo elástico, o qual utiliza aerossóis como traçadores.

Os sistemas lidar, mais modernos são monoestáticos, isto quer dizer que o receptor e o transmissor encontram-se no mesmo local, porém há sistemas que podem ser classificados como biestáticos, ou seja, o receptor e o transmissor encontram-se separados. Na categoria dos monoestáticos, existem dois tipos de configuração de lidar, o coaxial e o biaxial (COSTA, 2010).

A diferença entre estas subdivisões encontra-se no campo de visão dos receptores. Conforme demonstrado na figura 6, nos coaxiais o feixe de luz emitido pelo laser é transmitido no mesmo eixo que o campo de visão do receptor. Em contra partida, nos biaxiais, o feixe de luz é emitido próximo ao campo de visão do receptor, uma vez que o laser encontra-se próximo ao sistema de recepção (COSTA, 2010).

¹⁰ <https://oglobo.globo.com/sociedade/historia/descobertas-60-mil-estruturas-maias-escondidas-sob-floresta-na-guatemala-22356811>

Figura 6 - Tipos de arranjo de transmissor e receptor

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

O sistema lidar é composto por três partes principais, sendo essas: um transmissor, um receptor e um detector. A figura 7, ilustra um típico sistema lidar, monoestático e biaxial.

Figura 7 - Típica configuração de um sistema lidar

Fonte: Adaptado de COSTA, 2015.

O transmissor tem como função gerar os pulsos de luz e direcioná-los para a atmosfera. Nos sistemas lidar mais atuais esta função é de um laser pulsado. Os lasers são fontes ideais para os sistemas lidar devido à baixa divergência do feixe, os pulsos intensos de curta duração e a largura espectral estreita. (WEITKAMP, 2005; COSTA, 2015). Muitos sistemas utilizam um expensor de feixe na parte interna da unidade de transmissão para poder reduzir a divergência do feixe de luz antes que este seja enviado para a atmosfera (COSTA, 2015).

O receptor, consiste em um telescópio que tem a função de coletar os fótons retroespalhados na atmosfera. O espelho primário de um telescópio é elemento óptico do sistema de recepção. Este coleta a luz restroesplhada pelas partículas e moléculas presentes na atmosfera e a direciona essa luz em um *spot*. O tamanho desse espelho primário é um fator de extrema importância para determinar a eficácia de um sistema lidar, visto que um espelho primário grande coleta uma quantidade maior de luz retroespalhada aumentando assim o sinal obtido pelo sistema (WEITKAMP, 2005; COSTA, 2015).

O mecanismo geométrico do transmissor e do receptor é o que define o grau de concentração do sinal a breves distâncias. Para este caso, o feixe laser não pode ser integralmente digitalizado para o detector. Em vista disso, somente uma parte do sinal de retorno do lidar é mensurado e esta parte diversifica com a distância e depende: do diâmetro do feixe laser, das propriedades da imagem do telescópio, do campo de visão do receptor, da forma e da divergência do feixe e da localização dos eixos ópticos do transmissor em relação ao receptor (WEITKAMP, 2005).

Por último tem-se o conjunto detecção que é responsável por captar a luz que volta ao receptor e fornece um registro permanente da intensidade medida como uma função da altitude. A luz captada é transformada em sinal elétrico, o qual é enviado à um dispositivo eletrônico que será responsável por processar e gravar esse sinal (COSTA, 2015).

O sinal é detectado por meio de fotomultiplicadoras (PMTs) ou por fotodiodos de avalanche (APDs). Com as PMTs e APDs operando no modo *photon counting* (PC), ou contagem de fótons, é possível realizar a contagem individual dos fótons. Essa técnica é muito utilizada quando o sinal retroespalhado é fraco, pois

esta técnica é muito sensível. Este sinal fraco, pode ser oriundo de um processo de dispersão fraco ou quando a região investigada encontra-se distante do equipamento (WEITKAMP, 2005).

Por meio da técnica PC, o número de fótons é armazenado por unidade de tempo após a emissão do feixe laser. Para sinais retroespalhados mais intensos, é recomendado a utilização do método analógico (AN), pois a corrente elétrica média proveniente dos fótons do feixe é medida, convertida em sinal analógico e processada como um sinal digital (COSTA, 2015).

Por fim, tem-se o intervalo da resolução temporal. Segundo COSTA (2015) Δt refere-se a um intervalo de resolução espacial $\Delta R = c\Delta t/2$, onde c representa a velocidade da luz (c). O fator 1/2 está relacionado ao fato de a luz sair e retornar para o transmissor. Por exemplo, para o sinal armazenado com uma resolução espacial de 100 ns obtém-se uma resolução espacial de 15 m.

3.8.2.1 Equação lidar

A equação que descreve o sinal detectado por um sistema lidar, pode ser constituída por quatro fatores, sendo estes: fator do sistema, geométrico, coeficiente de extinção e a transmissão. Abaixo encontra-se a definição matemática descrita por WEITKAMP (2005).

$$P(R) = K G(R) \beta(R) T(R) \quad 3.1$$

O resultado desta relação matemática é $P(R)$, destacado em verde acima, o qual consiste na energia recebida (P) em função da distância (R).

Conforme descrito por WEITKAMP (2005) o primeiro termo da equação (K) é o fator que define o sistema e caracteriza a performance do mesmo. Sua definição matemática é descrita na equação abaixo:

$$K = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta \quad 3.2$$

Nela P_0 é a potência média de um único pulso laser e τ consiste no comprimento temporal do pulso. Assim a energia do pulso (E_0) é definida pela relação desses dois fatores, $E_0 = P_0 \tau$, de modo que a relação entre c (velocidade da luz) e τ , proporciona o comprimento do volume iluminado pelo pulso laser em um determinado tempo. O termo $\frac{1}{2}$ é incluído na equação devido ao processo de

retroespalhamento, o qual gera uma aparente duplicidade do pulso laser. Este processo está ilustrado na figura 8 (WEITKAMP, 2005; COSTA, 2015).

Ao detectar o sinal lidar em um instante t que fora emitido pela frente de onda do pulso (tal termo consiste na tradução do termo *leading edge pulse*, encontrado em COSTA, 2015), o retroespalhamento causado por esta frente de onda retorna a uma distância $R_1 = ct/2$, concomitantemente, a luz que fora produzida pela frente de onda posterior chega a uma distância $R_2 = c(t - \tau)/2$.

Dessa forma o $\Delta R = R_1 - R_2$ resulta em $\Delta R = c\tau/2$, que é o comprimento do volume ao qual a luz é retroespalhada em um determinado instante t , o qual configura o chamado comprimento efetivo do pulso. Na figura 8, A representa a área do receptor óptico primário que está encarregado da coleta da luz retroespalhada e η é a configuração geral do sistema. Nela estão inclusos a eficiência óptica de todos os componentes aos quais as luzes emitida e recebida passam e também a eficiência de detecção (WEITKAMP, 2005; COSTA, 2015).

Figura 8 - Ilustração da geometria de um lidar

Fonte: Adaptado de WEITKAMP, 2005.

O fator destacado em verde na equação é o fator geométrico. Expresso na equação abaixo.

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2} \quad 3.3$$

Nele são incluídos a função $O(R)$, nomeada de sobreposição (*overlap*), a qual está relacionada a sobreposição entre o feixe laser e o campo de visão do telescópio, e o termo R^2 . A redução da intensidade do sinal com a distância ao quadrado advém do fato de que a área do telescópio compõe uma superfície esférica que possui um raio R e que envolve o volume espalhado (WEITKAMP, 2005; COSTA; 2015).

Tomando como exemplo um espalhamento isotrópico, a uma distância R a área do telescópio coletará a fração

$$\frac{I_c}{I_s} = \frac{A}{4\pi R^2} \quad 3.4$$

da intensidade total I_s espalhada no ângulo sólido 4π , ou seja, o ângulo sólido A/R^2 é o ângulo de percepção do lidar para a luz espalhada a uma determinada distância R . Nota-se que na equação lidar o fator 4π não aparece explicitamente, isso acontece devido a definição do coeficiente de retroespalhamento (β) (WEITKAMP, 2005; COSTA; 2015).

De acordo com WEITKAMP (2005), o coeficiente de retroespalhamento, $\beta(R, \lambda)$, é o parâmetro atmosférico primário ao qual define a intensidade do sinal. Ele descreve o quanto de luz é espalhada para o receptor do sistema lidar. Sendo assim, para um ângulo de espalhamento de $\theta = 180^\circ$, $\beta(R, \lambda)$ será o valor específico para o coeficiente de espalhamento para tal ângulo.

Baseando-se que N_j seja a concentração de partículas espalhadas de uma espécie j em um volume espalhado pelo pulso laser e $d\sigma_{j,sca}(\pi, \lambda)/d\Omega$ seja a seção de choque de espalhamento para um dado comprimento de onda, λ . O coeficiente de retroespalhamento pode ser descrito assim:

$$\beta(R, \lambda) = \sum N_j(R) \frac{d\sigma_{j,sca}}{d\Omega}(\pi, \lambda) \quad 3.5$$

Esta descrição admite todos os tipos de espalhadores. Com o número de concentração dado em m^{-3} e a seção de choque de espalhamento em m^2sr^{-1} , o coeficiente de retroespalhamento possui a unidade de $m^{-1}sr^{-1}$ (WEITKAMP, 2005).

Retornando à um cenário em que ocorra um espalhamento isotrópico e admitindo que há apenas um tipo de material espalhador, ou melhor, um único tipo de partícula no volume de espalhamento, a relação entre o coeficiente de

retroespalhamento e a seção de choque de espalhamento isotrópica (σ_{sca}) é dada por $4\pi\beta = N\sigma_{sca}$. A intensidade da luz espalhada por um volume, $V = A_L \Delta R = A_L c\tau/2$, onde A_L equivale a seção do feixe laser, é proporcional a área da seção de choque de espalhamento de todas as partículas no volume V . Desse modo pode-se escrever a intensidade relativa do sinal como:

$$\frac{I_S}{I_0} = \frac{A_S}{A_L} = \frac{N\sigma_{sca}c\tau}{2} = \frac{4\pi\beta c\tau}{2} \quad 3.6$$

Ao substituir a equação 3.6 na equação 3.4, obtém-se a relação de intensidade da luz emitida. A parte que encontra-se a direita da equação é a parte que se refere diretamente ao espalhamento geométrico, sendo assim, ela traz informações sobre propriedades do retroespalhamento, do volume espalhado, bem como o ângulo de percepção do lidar (WEITKAMP, 2005).

$$\frac{I_S}{I_0} = \frac{A\beta c\tau}{2R^2} \quad 3.7$$

A luz emitida pelo laser é espalhada por moléculas e pelo material particulado presentes na atmosfera. Tal fenômeno é expresso por:

$$\beta(R, \lambda) = \beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda) \quad 3.8$$

Na equação acima, tem-se o espalhamento molecular (Rayleigh) - β_{mol} , o qual em sua maior parte ocorre por meio da interação da radiação com moléculas de oxigênio e nitrogênio. Embora exista uma dependência com a altitude e, também com a densidade do ar. Os valores obtidos por um equipamento de sensoriamento afixado em solo e um alocado em uma aeronave ou espaçonave variam. No primeiro caso os valores tendem a diminuir com distância, já no segundo tendem a um aumento (WEITKAMP, 2005).

O espalhamento causado por material particulado (Mie), tratado na equação 3.8 pelo índice *aer* que provém da palavra aerossol, possui uma alta variabilidade, pois, depende da escala espacial e temporal. Aspectos como a composição química, estado físico, propriedade físico-químicas da partícula interferem nos valores do coeficiente de espalhamento de partículas (WEITKAMP, 2005).

O último termo da equação lidar trata-se da luz que desvia-se no caminho óptico. Este chama-se transmissão, $T(R)$. Ele por sua vez terá valores que variam entre 0 e 1 e está descrito na equação 3.9.

$$T(R, \lambda) = \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right] \quad 3.9$$

Este termo origina-se de uma fórmula específica da lei para lidar de Lambert-Beer-Bouguer. Na equação 3.9 a integral considera o caminho entre o lidar e a distância R . O fator 2 é incluído devido ao caminho de ida e de volta da luz. Com isto, chama-se de extinção da luz a somatória de todas as perdas na transmissão (WEITKAMP, 2005).

A extinção por sua vez pode ser definida de modo semelhante ao coeficiente de retroespalhamento. Portanto ela equivale ao produto da concentração de partículas espalhadoras em um determinado volume iluminado e a seção de choque de extinção ($\sigma_{j,ext}$) para cada tipo de espalhamento j . A equação 3.10 demonstra tal relação matemática (WEITKAMP, 2005; COSTA, 2015).

$$\alpha(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \sigma_{j,ext}(\lambda) \quad 3.10$$

Ressalta-se que a extinção pode ocorrer em consequência do espalhamento e da absorção da luz por partículas e moléculas. Com esta perspectiva, pode-se reescrever o coeficiente de extinção (equação 3.11) como a soma de quatro fatores, estes são: absorção (abs), espalhamento (sca), tanto para moléculas (mol) como para aerossóis (aer).

$$\alpha(R, \lambda) = \alpha_{mol,sca}(R, \lambda) + \alpha_{mol,abs}(R, \lambda) + \alpha_{aer,sca}(R, \lambda) + \alpha_{aer,abs}(R, \lambda) \quad 3.11$$

Segundo relatado por WEITKAMP (2005), devido ao fato do espalhamento ocorrer em todas as direções, ele interfere, ou seja, coopera para que ocorra a extinção da luz na atmosfera. Desse modo, a integral da seção de choque de espalhamento junto a seção de choque de absorção, resulta na seção de choque da extinção. Assim, pode-se escrever a seção de choque de extinção como a soma das seções de choque da absorção e do espalhamento (equação 3.12), em vista disso a unidade final é m^{-1} .

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{sca}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda) \quad 3.12$$

Após explorar individualmente cada componente da equação lidar é possível realizar a substituição, resultando na equação abaixo (equação 3.13).

$$P(R) = K G(R) \beta(R) T(R)$$

3.13

$$P(R) = P_0 \frac{c\tau}{2} A_{\eta} \frac{O(R)}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]$$

$$\beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda)$$

Destaca-se que o sinal detectado por um sistema lidar sempre estará acrescido de um ruído de fundo, chamado de *background* e representado por P_{bg} . O sinal de background advém da interferência de fontes externas de energia eletromagnética, neste caso a luz, a fonte laser. Durante o dia o *background* será ocasionado principalmente pela luz do Sol, enquanto que a noite esse será provido pela luz das estrelas tanto quanto por fontes de luzes artificiais. Este ruído deve ser subtraído dos dados antes de se iniciar a análise (WEITKAMP, 2005).

Por fim, se faz necessário a eliminação de ruído proveniente do detector, este pode ser eliminado por meio da técnica denominada corrente escura, a qual é realizada uma aquisição de dados com o receptor coberto, assim o resultado obtido será o ruído do detector (WEITKAMP, 2005).

3.8.2.2 Sinal RCS

RCS é a abreviatura de *range corrected lidar signal* (ou sinal retroespalhado corrigido). Esse sinal lidar é geralmente plotado em uma forma semi-logarítmica para enfatizar a atenuação do sinal em relação ao seu alcance. Sendo assim se a quantidade de atenuação atmosférica for pequena, a amplitude do sinal corrigido é aproximadamente proporcional à densidade do aerossol (KOVALEV e EICHINGER, 2004).

O sinal retroespalhado corrigido é calculado conforme o diagrama apresentado abaixo:

Figura 9 - Diagrama RCS

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

O sinal bruto é a informação obtida no exato momento da aquisição de dados. O background (BG) por sua vez, pode ser obtido através de uma média dos dados adquiridos, utilizando as informações que encontram-se mais distantes, em uma região onde espera-se que não tenham fótons retroespalhados (KOVALEV e EICHINGER, 2004; WEITKAMP, 2005). Assim como citado no tópico anterior há a extração do *dark current* (corrente escura), ou seja, é retirado do ruído do detector que encontra-se presente no sinal obtido.

Por fim tem-se a correção relacionada ao alcance (R). Esta variável tem como objetivo corrigir o sinal que cai por volta de $1/r^2$ em longas distâncias. Efetuando a correção do sinal com o alcance, obtém-se o RCS. (KOVALEV e EICHINGER, 2004).

A utilização deste sinal (RCS) proporciona uma ampla gama de resultados para sistemas lidares. Cita-se como exemplo a alteração do ângulo de elevação do lidar enquanto mantém-se constante a angulação azimutal, obtém-se uma varredura do indicador de altura de alcance (RHI), figura 10, o resultado deste escaneamento da atmosfera permite observar as mudanças ocorridas na região ao longo do tempo, por meio de um perfil vertical (KOVALEV e EICHINGER, 2004).

Figura 10 - Exemplo de RHI

Fonte: adaptado de KOVALEV e EICHINGER, 2004.

Por outro lado, caso mantenha-se a elevação constante enquanto altera-se o ângulo do azimute, é produzida uma varredura do indicador do projeto do plano (PPI), figura 11, mostrando as mudanças de concentração relativas em uma área ampla (KOVALEV e EICHINGER, 2004). Sendo esta a técnica que será aplicada ao presente trabalho.

Figura 11 - Exemplo de resultado de PPI

Fonte: adaptado de KOVALEV e EICHINGER, 2004.

3.9 GIOVANNI

GIOVANNI é a abreviatura de *Goddard Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure*. O mesmo consiste em uma plataforma on-line desenvolvida pela *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC), departamento pertencente a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Conforme BERRICK et al. (2009), ele surge da necessidade da exploração dos dados provenientes de multissensores de ciências da Terra, de uma maneira mais rápida e fácil. Uma vez que o acesso dessas informações era complexo, devido a necessidade de se realizar o *download* e entender toda a estrutura do dado, demandando assim, um tempo maior para a realização de análises dos mesmos.

Todo o processo de disponibilização de dados advém de algoritmos cientificamente válidos e um magnífico esquema para descrever os parâmetros dos dados. Por intermédio de uma interface intuitiva, os usuários podem visualizar

um ou vários parâmetros, bem como obter: a análise estatística, dados georreferenciados, séries temporais, entre outros, sendo esses dados oriundos de vários tipos de sensores e modelos. A figura 12 abaixo consiste em um fluxograma do funcionamento do Giovanni (BERRICK et al., 2009).

Figura 12 - Arquitetura funcional da plataforma GIOVANNI em sua versão 3

Fonte: Adaptado de BERRICK et al., 2009

Devido ao fato de não trabalhar com diversos conjuntos de dados com estruturas, resoluções, formatos e indicadores de qualidade variados, os resultados são obtidos rapidamente por meio da plataforma e são considerados seguros (BERRICK et al., 2009).

Segundo BERRICK et al. (2009) o GIOVANNI tem a capacidade de suportar diversos protocolos de interoperabilidade e dados em vários formatos, desse modo permite acessar dados de diferentes provedores. Tais características proporcionam aos pesquisadores serviços de análise e comparação de propósito geral agindo com base em dados de alta qualidade.

Atualmente a plataforma GIOVANNI encontra-se na versão 4.28 e dispõe os dados referente aos seguintes tópicos: aerossóis, química atmosférica,

dinâmica atmosférica, criosfera, hidrologia, biologia oceânica, oceanografia, água e ciclo de energia.

3.9.1 MERRA 2

A reanálise associa modelos com observações distribuídas irregularmente no espaço e no tempo em um conjunto de dados meteorológicos em grade espacialmente completa, com um modelo e sistema de análise que não sofrem mudanças, as quais abrangem o registro de dados históricos (RIENECKER et al., 2011).

Assim pode-se expressá-la como um modelo de previsão subjacente que visa combinar observações heterogêneas de maneira fisicamente consistente, permitindo assim a produção de dados em grade para uma ampla gama de variáveis, incluindo aquelas que são raramente ou não observadas diretamente (GELARO et al., 2017).

O *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* (MERRA) foi estimulado pelo reconhecimento de que vários aspectos do ciclo hidrológico representados em gerações anteriores de reanálises não eram adequados para estudos climáticos e climatológicos. O MERRA propôs melhorar o ciclo da água como uma contribuição para a comunidade científica e para reanalisar a pesquisa (REICKNER et al., 2011).

Assim tanto o *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* quanto a sua segunda versão, MERRA-2, são métodos de reanálise atmosférica da era moderna de satélites, produzidos pelo *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) da NASA (GELARO et al., 2017).

O MERRA-2 fornece dados a partir de 1980 e foi inserido para substituir o MERRA original em razão dos avanços realizados no sistema de assimilação que permitem a integração dos dados da radiância hiperespectral moderna e das observações de micro-ondas. Também são utilizadas as observações de perfil de ozônio da NASA iniciadas no final de 2004. Avanços adicionais no modelo GEOS e no sistema de assimilação GSI estão incluídos no MERRA-2, a figura 13 apresentada a seguir expõe todas as fontes de dados, ou seja, as ferramentas

observacionais. A resolução espacial permanece praticamente a mesma (cerca de 50 km na direção latitudinal) como no MERRA (GMAO, 2017; GALERO et al., 2017).

Figura 13 - Resumo do sistema de observação utilizado pelo MERRA

Fonte: Adaptado de REICKNER et al., 2011

A análise feita pelo MERRA-2 é computada por uma grade de latitude-longitude com a mesma resolução espacial do modelo atmosférico usando um algoritmo 3DVAR (*Three-dimensional variational data assimilation*) baseado no GSI (*Gridpoint Statistical Interpolation*) com um ciclo de atualização de 6 horas e o chamado procedimento FGAT (*First guess at appropriate time*) para reduzir a saída de dados com o ruído alto (GELARO et al., 2017).

3.10 HYSPLIT

O *Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) é um modelo computacional pertencente a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Ele consiste em um modelo voltado para o cálculo de trajetórias de massas de ar, bem como algumas variáveis meteorológicas: temperatura ambiente, precipitação, umidade relativa e fluxo de radiação solar (ALAM, QURESHI e BLASCHKE, 2011).

Entre as aplicações mais utilizadas estão a análise de retrotrajetória, a qual permite identificar a origem das massas de ar e estabelecer uma relação entre fonte e o seu receptor.¹¹

A metodologia aplicada para os cálculos do modelo é composta por dois métodos diferentes: a abordagem lagrangeana, usando um referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão conforme as trajetórias ou parcelas de ar se movem de sua origem, e método euleriano, o qual baseia-se em uma grade fixa como referencial para calcular as concentrações de poluentes.¹¹

O modelo pode ser executado interativamente na Web através do website (<https://ready.arl.noaa.gov/index.php>), ou em modo off-line (versão desktop) a partir de um código executável e dados meteorológicos, os quais podem ser baixados em um computador.

A versão online (web) foi configurada com algumas limitações para evitar a saturação computacional do servidor web. A versão para computador registrada é completa sem restrições computacionais, exceto que os usuários devem obter seus próprios arquivos de dados meteorológicos.¹¹

A versão não registrada é idêntica à versão registrada, exceto que as concentrações de pluma não podem ser calculadas com arquivos de dados meteorológicos previstos. O modelo somente de trajetória não possui restrições e as trajetórias de previsão ou arquivamento podem ser calculadas com qualquer das versões.¹¹

¹¹ <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>

4 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão retratados e descritos: o sistema LIDAR utilizado na presente pesquisa; a região de estudo; a plataforma GIOVANNI e a QUALAR; e o modelo HYSPLIT.

4.1 Caracterização de Cubatão

O município de Cubatão está situado entre as latitudes 23°50' a 23°55' Sul e na longitude 46°30' Oeste, no estado de São Paulo. Fazendo limite com as cidades de Santos, São Vicente, Santo André e São Bernardo¹².

De acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010 a população da cidade era de 118.720 habitantes, que ocupam uma área de 142,879 km² (IBGE, 2017).

A topografia de Cubatão é constituída por duas regiões distintas: a área serrana, que possui altitude máxima de 700 metros, e a de planície. De modo que tais aspectos influenciam o clima do município. A serra de Cubatão, divide-se em estágios menores afastados do bloco principal. Isto dá origem a região de vale na cidade¹².

A região conta com diversas fontes emissoras de diferentes poluentes, sendo estas fixas e móveis. As fontes móveis consistem basicamente em veículos leves e pesados que circulam pela cidade. Por abrigar um polo industrial, o abastecimento de insumos para as indústrias e a sua distribuição para a sociedade, se dá por meio de caminhões, em alguns casos por meio da malha ferroviária. Além do fato de que a interligação ente a região de planalto e a planície ocorre por meio de rodovias que passam pela cidade.

As fontes fixas são em sua maioria as indústrias – de acordo com a sua prefeitura existem aproximadamente 23 - que estão instaladas na cidade¹³. Ademais, tal localidade detém uma extensa região de mata atlântica, que emite compostos orgânicos que cooperam para a formação de outros poluentes na atmosfera.

¹² <http://www.cubatao.sp.gov.br/aspectos-geograficos/>

¹³ <http://www.cubatao.sp.gov.br/aspectos-economicos/>

4.1.2 Coleta dos dados *in situ*

As campanhas, denominações para medidas em campo com o sistema lidar, foram realizadas em locais distintos, porém, todos na região industrial e também próximo a uma das estações da CETESB.

As primeiras tomadas de dados foram realizadas em 17 de agosto de 2016, no bairro Vila Parisi, em frente ao Ecopátio. A aquisição de dados foi iniciada no período da manhã (11h 40) e finalizada a tarde, por volta das 15h. No mesmo mês também foi realizada uma aquisição de dados no dia 25, em um período de coleta semelhante ao do dia 17 de agosto (aquisição iniciada ao 12h07 e finalizada por volta das 13h), porém na região Vale do Mogi.

A terceira parte da coleta de dados aconteceu em 15 de maio de 2017, também no Vale do Mogi, no período de 11h17 às 13h11. A figura 12 abaixo retrata os locais, nos quais as campanhas foram realizadas.

Figura 14 - Localização das campanhas

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (17 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°51'23.02"S, 46°23'29.30"O, Altitude do ponto de visão 13.19 km. Globo Digital 2019. <http://www.earth.google.com> [13 de abril de 2019].

4.2 Lidar Elástico

Para este estudo fora utilizado um sistema lidar - articulado, biaxial, elástico e operando em três comprimentos de onda - elaborado pela *Raymetrics lidar Systems S.A*, figura 15.

Figura 15 - LIDAR utilizado para a aquisição dos dados

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

O transmissor deste LIDAR elástico é composto por um laser Q-switched comercial Nd:YAG da Quantel S.A. modelo CFR 450, que opera em três comprimentos de onda: 355 nm, 532 nm e 1064 nm, do qual a energia do pulso é de 100 mJ, 200 mJ e 400 mJ, para os respectivos canais. A taxa de repetição do laser é de 20 Hz e a duração dos pulsos é de 7 ± 2 ns. A divergência do pulso laser do sistema de transmissão é menor que 0,3 mrad. Além disso o feixe laser pode alcançar uma distância por volta de 140 m (COSTA, 2015; COSTA et al., 2016; COSTA et al., 2013).

O receptor deste sistema é composto por um telescópio cassegraniano (Dall-Kirkham), o qual possui 150 mm de diâmetro e com a distância focal efetiva de 1000 mm. O sistema em questão atua com o campo de visão de 1 mrad e razão focal de 4,5. Desse modo a configuração permite uma sobreposição (*overlap*) completa entre o feixe de laser e o campo de visão com uma distância de aproximadamente 140 m. Salienta-se que a resolução espacial do sistema é de 7,5 m (COSTA, 2015; COSTA et al., 2013).

O sistema detector para os canais 355 nm e 532 nm são duas fotomultiplicadoras comerciais – Hamamatsu R7400U – e um fotodiodo de avalanche - EG & G - para o canal 1064 nm (COSTA, 2015; COSTA et al., 2013).

A estes canais foram conectados filtros de interferência de banda estreita com uma largura à meia altura de 0,1 nm, sendo ambos os canais operados nos modos analógico e *photoncounting*. O sinal coletado pelo receptor chega as fotomultiplicadoras e ao fotodiodo, sendo em seguida destinado à um registrador transiente. Esse registrador está conectado por meio de rede a um computador, o qual permite a interpretação dos dados por meio do *software LabVIEW* (COSTA, 2015).

Os sistemas de transmissão e recepção encontram-se fixos em uma base de varredura que fora adaptada de um rastreador solar de 2 AP (Kipp & Zonen), que permite mover o sistema lidar horizontalmente e verticalmente com precisão de menos de 0,02 graus. Ademais o sistema possui dois motores de passo, que são controlados por meio de um microcomputador integrado ao equipamento, permitindo assim a realização de varreduras completas nas áreas de interesse (COSTA et al., 2013).

Os resultados obtidos foram tratados e analisados por intermédio de *softwares* como o *Mathematica* e o *Python*, com rotinas desenvolvidas pela Dr^a Renata F. da Costa e pela Msc. Mácia Talita A. Marques. Tais rotinas permitem gerar gráficos de indicador de posição de plano (PPI) do RCS para cada comprimento de onda do sistema (COSTA et al., 2016).

Posteriormente estes dados foram georreferenciados com o auxílio do programa QGIS (*software* livre de Sistema de Informação Geográfica (SIG)).

4.3 Lidar Doppler

O lidar doppler utilizado neste trabalho é um modelo de pulsação da *Windcube V2* da *Leosphere*, tal sistema lidar proporciona informações relacionadas ao vento (COSTA et al., 2018).

A aquisição de dados ocorre quando o sistema identifica uma mudança de frequência da luz refletida oriunda do movimento das partículas, desta forma a mudança na frequência é proporcional à velocidade da linha de visão, possibilitando assim a obtenção de informações de velocidade e direção do vento (COSTA et al., 2018).

O LIDAR doppler foi posicionado próximo ao LIDAR elástico, conforme disposto na imagem 16, e programado para medir o perfil vertical da direção e das velocidades do vento em 12 níveis de 40 a 290 m, registrando uma média de 10 minutos com uma resolução temporal de 1 Hz (COSTA et al., 2018).

Figura 16 - Lidar doppler durante aquisição de dados

Fonte: Autor da dissertação, 2016.

4.4 Estações de monitoramento CETESB

A cidade de Cubatão dispõe de três estações de monitoramento da CETESB, sendo estas: Cubatão - Vila Parisi, Cubatão – Vale do Mogi e Cubatão Centro.

Conforme descrito no relatório da qualidade do ar de 2017 da CETESB, tais estações são automáticas, contando ainda com uma estação manual que está localizada na estação Vila Parisi. As estações automáticas localizadas na região industrial são denominadas Cubatão – Vila Parisi e Cubatão - Vale do Mogi.

A estação Cubatão-Vale do Mogi, está localizada na Avenida Engenheiro Plínio de Queiróz, s/nº - Jd São Marcos - Cubatão. O código da estação é 119, sendo que ela pertence a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) baixada santista e iniciou sua operação em 05/04/2006 e assim permanece até o presente momento. Os parâmetros que a estação monitora são: direção do vento, direção do vento global, MP₁₀, NO, NO₂, NO_x, O₃, radiação solar global, radiação ultra-violeta, velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura do ar, SO₂ e desvio padrão da direção do vento.

Já a estação Cubatão-Vila Parisi, está situada na Rua Prefeito Armando Cunha, s/nº - Vila Parisi - Cubatão. O código da estação é 66, ela pertence a UGRHI baixada santista e encontra-se operacional desde 01/01/1998 até o presente momento. Os parâmetros que a estação monitora são: direção do vento, direção do vento global, MP₁₀, NO, NO₂, NO_x, O₃, radiação solar global, velocidade do vento e SO₂.

Por fim tem-se a estação Cubatão – Centro, estabelecida na Rua Salgado Filho, 121 - Parque Fernando Jorge - Cubatão. O código da estação é 87, e assim como as outras encontra-se na UGRHI baixada santista e está operando desde 01/01/1998 até o presente momento. Os parâmetros que a estação monitora são: benzeno, direção do vento, direção do vento global, MP₁₀, NO, NO₂, NO_x, O₃, radiação solar global, pressão atmosférica, temperatura do ar, tolueno, velocidade do vento, SO₂ e umidade relativa do ar.

4.4.1 Dados QUALAR

O QUALAR é uma plataforma on-line da CETESB, que possibilita a consulta dos dados de poluentes coletados por suas estações, tanto da rede automática como da rede manual, através do endereço eletrônico da CETESB (CETESB, 2017).

Essa ferramenta da CETESB é aberta ao público e, encontra-se disponível no endereço (<http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/>). Para ter acesso aos

dados é necessário apenas realizar um breve cadastro e, com este será possível acessar a parte de consultas e relatórios, como demonstra a figura 17. O público tem acesso a quase todas as funções do site, contudo, os dados resgatados para este trabalho foram obtidos através da parte de relatórios e consultas.

Em Relatórios são disponibilizadas as seguintes funções: valores diários, mensal, concentração diária da rede manual, caracterização das estações, índice de ventilação anual, distribuição de frequência, frequência de inversão térmica, gerar gráfico de parâmetro e gerar gráfico comparativo¹⁴.

Na parte de consultas é possível obter os seguintes dados: qualidade do ar em tempo real, dados horários por estação, dados horários por parâmetro, boletim diário, resumo boletim diário, boletim meteorológico, configurações das estações e exportar dados. Sendo este último recurso aplicado a este trabalho, de modo que através dele foi possível obter os dados horários das estações desejadas em arquivo no formato *comma-separated values* (csv).

Figura 17 - Interface do sistema QUALAR da CETESB

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

Mediante todas as opções disponíveis na plataforma QUALAR, foi utilizada apenas a opção de exportar dados avançados, conforme exposto na imagem 17. Por este recurso é possível resgatar os dados horários de diversos anos. Para efetuar tal resgate de dados é preciso preencher alguns campos, como: a data inicial e final e, o parâmetro de interesse do usuário (figura 18). Para o presente trabalho foram empregados os dados de concentração de MP_{10} e velocidade dos ventos, para os meses de agosto de 2016 e maio de 2017; além das médias anuais dos anos de 2008 a 2017.

¹⁴ <http://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>

Figura 18 - Interface para recuperação dos dados

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DA QUALIDADE DO AR V 3.83

[ESTAÇÃO](#)
[PARÂMETRO](#)
[ENTRADA DE DADOS](#)
[CONSULTAS](#)
[RELATÓRIOS](#)
[SAIR](#)

EXPORTAR DADOS AVANÇADO

Tipo de Rede: Automática

Data Inicial*: 01/08/2017 Data Final*: 31/08/2017

Estação*: Cubatão-V.Parisi

PARÂMETROS (escolha no máximo 3)	
☐	DV (Direção do Vento)
☐	DVG (Direção do Vento Global)
☒	MP10 (Partículas Inaláveis)
☐	NO (Monóxido de Nitrogênio)
☐	NO2 (Dióxido de Nitrogênio)
☐	NOx (Óxidos de Nitrogênio)
☐	O3 (Ozônio)
☐	SO2 (Dióxido de Enxofre)
☐	VV (Velocidade do Vento)

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

4.5 Recuperação de dados do GIOVANNI

Os dados viabilizados pela plataforma GIOVANNI, são pertencentes aos seguintes instrumentos de sensoriamento remoto e modelos: AIRS, AMSR-2, AMSR-E, Aquarius, modelo FLDAS, modelo GLDAS, GPM, GRACE, modelo MERRA, modelo MERRA-2, MISR, MODIS-Aqua, MODIS-Terra, MOPITT, NCA-LDAS, modelo NLDAS, modelo NOBM, OCTS, OMI, SSMI, SeaWiFS, TOMS EP, TOMS Meteor-3, TOMS Nimbus-7 e TRMM.

Ademais, tal plataforma dispõe de cinco opções (mapa, comparações, vertical, séries temporais e diversos), as quais possibilitam gerar tanto os gráficos prontos, quanto os dados aos quais pretende-se obter. Cada uma destas opções possui categorias para serem manipuladas.

Para este trabalho foi escolhido a *area – avareged*, pertencente a área de séries temporais. Esta função, calcula os valores médios de uma dada variável no intervalo de tempo estipulado pelo usuário para a área selecionada. Os períodos sem dados não contribuem para o cálculo das médias. Cada valor médio é então plotado em relação ao tempo para criar os resultados da série temporal¹⁵.

Assim como o sistema QUALAR a plataforma GIOVANNI requer um cadastro para realizar o *download* dos dados. Para efetuar o resgate dos dados é

¹⁵ <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/doc/UsersManualworkingdocument.docx.html#h.sqh76fexahh5>

preciso informar o tipo de informação desejada através da primeira parte destacada em laranja na figura 19.

A região destacada em vermelho na figura 19, é o local onde coloca-se o período ao qual deseja-se obter os dados e também é onde são inseridas as coordenadas para a seleção da região pretendida. Para isto pode-se selecionar a região no mapa que é fornecido ao escolher esta opção ou então colocar a localização com o formato: oeste, sul, leste, norte. Para Cubatão foi selecionada uma região que abrange toda a cidade, sendo estas as coordenadas: -46.4653,-23.9234,-46.3678,-23.8204.

Figura 19 - Interface da plataforma GIOVANNI

The screenshot shows the GIOVANNI web interface. The 'Select Plot' section has a dropdown menu set to 'Time Series: Area-Averaged'. The 'Select Date Range (UTC)' section shows a date range from '2016 -01 -01' to '2016 -12 -31'. The 'Select Region (Bounding Box or Shape)' section shows coordinates '-46.4653,-23.9234,-46.3678,-23.8204'. A red box highlights these two sections. A red arrow points to the 'Plot Data' button at the bottom right.

Variable	Units	Source	Temp Res.	Spat. Res.	Begin Date	End Date
Aerosol Absorption Optical Depth 388 nm (OMAERUVd v003)	-	OMI	Daily	1 °	2004-10-01	2018-09-23
Aerosol Absorption Optical Depth 500 nm (OMAERUVd v003)	-	OMI	Daily	1 °	2004-10-01	2018-09-23
UV Aerosol Index (QATO3d v003)	-	OMI	Daily	1 °	2004-10-01	2018-09-24
Aerosol Optical Depth 555 nm (MIL3DAE v4)	-	MISR	Daily	0.5 °	2000-02-25	2017-05-31
Aerosol Optical Depth 550 nm (SWDB_L305 v004)	-	SeaWiFS	Daily	0.5 °	1997-09-03	2010-12-11
Aerosol Optical Depth 550 nm (Land-only) (SWDB_L305 v004)	-	SeaWiFS	Daily	0.5 °	1997-09-03	2010-12-11

Fonte: autor da dissertação, 2018.

Destaca-se a importância de se observar as datas de início e de fim dos dados, área designada com a seta na figura 19, pois alguns satélites já não encontram-se mais em órbita.

Após inserir todas as informações requeridas pelo sistema, é necessário escolher um parâmetro que pode ser: um dos instrumentos de sensoriamento remoto, a resolução espacial, resolução temporal ou informações relacionadas a atmosfera, como por exemplo: aerossol, ventos, temperatura, etc. No caso deste trabalho foram extraídos os seguintes dados: *total precipitable water vapor (time average)* e *surface wind speed (instantaneous)*.

Para obter-se os resultados é preciso apenas pressionar a opção *plot data* e o usuário será redirecionado para a próxima área, na qual encontram-se disponíveis os dados, conforme ilustra a figura 20. Ao ser redirecionado para esta área é imprescindível selecionar a opção *downloads* na parte esquerda, conforme indicado pela seta verde na imagem 20.

Logo após serão disponibilizados os dados em diferentes formatos, os quais dependem diretamente da opção selecionada. Seguindo o parâmetro escolhido, foram apresentados em dois formatos apenas, sendo ASCII csv (tabela excel) e PNG (imagem). Devido a possibilidade de manipular os dados, foi escolhida a opção csv para a execução deste trabalho.

Figura 20 - Interface da plataforma GIOVANNI para download de dados

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

Por fim, ao manipular os dados é imprescindível observar as informações apresentadas no cabeçalho dos dados recuperados, figura 21. Nele existem informações importantes como: a data de início e fim, a área delimitada pelo usuário, a área ajustada pelo sistema e o *fill value* (valor que preenche os dias sem valores).

Figura 21 - Cabeçalho dos dados

Title:,Time Series, Area-Averaged of Surface wind speed, Instantaneous hourly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 Model ()									
User Start Date:,	2016-08-17T00:00:00Z								
User End Date:,	2016-08-17T23:59:59Z								
User Bounding Box:,"	-46.4653,-23.9234,-46.3678,-23.8204"								
Data Bounding Box:,"	-46.25,-24,-46.25,-24"								
URL to Reproduce Results:,"	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=2016-08-17T00:00:00								
Fill Value (mean_M2I1NXLFO_5_12_4_SPEEDLML):	1e+15								

Fonte: autor da dissertação, 2018.

4.6 Aplicação do Hysplit

A versão aplicada para o desenvolvimento e consequente análise das trajetórias, foi o Hysplit *off-line* (versão *desktop*). A direita da imagem 22 (abaixo exibida) encontra-se a primeira tela que é apresentada pelo sistema. Nela deve ser selecionada a opção menu. Após acessar o menu, são apresentadas 4 opções, sendo essas: meteorologia, trajetória, concentração e avançado. Para este trabalho fora escolhida a opção trajetória.

O primeiro passo após selecionar a opção trajetória é realizar a configuração do Hysplit, isso transcorre por meio da opção *Setup Run* (figura 22). Nela serão inseridas as informações para o sistema poder calcular as trajetórias desejadas.

Figura 22 - Interface primária do HYSPLIT

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

Ao abrir o *Setup Run*, será apresentada a tela indicada na figura 23, na qual são requeridas as seguintes informações:

- *Starting time* (data de início): nesta seção devem ser incluídas a data e o horário em que deseja-se iniciar as trajetórias. Tal campo está indicado pela primeira seta vermelha na imagem 23.

- *Number of starting location* (número posições de início): em tal campo deve ser incluído o número de trajetórias que serão exibidas. Em seguida inclui-se em cada uma das trajetórias a latitude. A longitude e a altura a partir do solo (AGL – *Above Ground Level*), sendo esta em metros. Para a realização do estudo foram utilizadas duas latitudes e longitudes diferentes: -23.8314, -46.3694 (Vale do Mogi) e -23.8538, -46.39131 (Vila Parisi). Além de quatro diferentes alturas (300m, 500m, 1000m e 1500m).

- *Total run time* (tempo total): neste espaço é necessário incluir a quantidade de horas que serão aplicadas para o cálculo das trajetórias. Neste caso foi decidido que seria utilizado um curto período para analisar as mesmas, sendo aplicado 6 horas, tanto para as trajetórias para frente como as para trás.

- *Vertical motion method* (método de movimento vertical): nesta área é preciso escolher qual o tipo de movimento vertical para a região. O Hysplit dispõe de 9 opções de dados de modelo de entrada. Neste estudo a opção 0 foi utilizada.

- *Direction* (direção): há apenas duas possibilidades nesta região, para frente (*foward – Fwrd*) ou para trás (*backward – Back*). Ambas foram aplicados neste trabalho.

- *Output* (saída): área destinada para identificar o destino do arquivo, bem como o seu nome.

- *Add meteorology files* (inclusão dos dados meteorológicos): os arquivos aqui incluídos são oriundos da própria NOAA, denominados gdas (*global data assimilation system*).

Figura 23 - Interface de configuração

Fonte: autor da dissertação, 2018.

Logo após realizar a configuração dos dados necessários para gerar um arquivo tdump (todo arquivo que for gerado pelo modelo em questão terá o tdump no início do nome), é necessário clicar em *Run model* e aguardar a realização dos cálculos e a criação do arquivo tdump.

Com a etapa acima concluída, é necessário gerar as imagens com os dados obtidos. Isto é providenciado por meio da função *Display* em seguida selecionando *Trajectory*, conforme exposto na imagem 24. Neste estágio é preciso incluir o arquivo gerado anteriormente na região *Input Endpoints*.

Figura 24 - Configurações para gerar a imagem

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

Em *output postscript* deve-se incluir o nome do arquivo final, ou seja, o nome da figura que será gerada. Em seguida deve ser estabelecida a projeção (*projection*), neste caso adotou-se a opção auto e para a saída GIS (sistema de informações geográficas – SIG ou GIS) foi escolhida a opção KML/KMZ, a qual gera as trajetórias no *Google Earth*, permitindo uma melhor interpretação e observação das mesmas.

Por fim é necessário estabelecer as coordenadas verticais (*vertical coordinates*) e o zoom (*most zoom* ou *least zoom*), para poder deixar a perspectiva da imagem mais próxima ou mais distante da trajetória.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em um primeiro momento foram observados os dados de concentrações de todos os poluentes das estações de monitoramento de Cubatão, dados oriundos da rede automática. Foi identificado que o poluente mais problemático na região é o MP_{10} , deste modo foram observadas as médias anuais das três estações de monitoramento da cidade, estas estão dispostas na figura 25.

Figura 25 - Médias aritméticas anuais das estações de monitoramento de Cubatão

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

A meta intermediária em vigor no estado de São Paulo é a MI1, a qual diz que a média aritmética anual não deve ser superior a $40\mu\text{g.m}^{-3}$. Das três estações na região apenas a do centro mantém os valores dentro dos padrões (figura 25). Salienta-se que esta é a única estação que encontra-se fora da região industrial e também da região de vale.

Um fator importante nos resultados apresentados acima é o decréscimo mais acentuado nos valores de material particulado a partir do ano de 2015. Isto ocorre simultaneamente ao início de uma crise financeira, que atingiu o polo industrial neste período. Como efeito a esta crise, ocorrera a redução na produção de parte das indústrias da região¹⁶.

¹⁶ <https://www.valor.com.br/empresas/4375920/efeito-usiminas-ja-atinge-cubatao>

A redução nas produções podem ter influenciado diretamente as reduções expressivas de material particulado que intensificou a partir do ano de 2015, já que são as maiores fontes emissoras estacionárias na região. Isto pode ser demonstrado por meio de estimativas presentes nos relatórios da CETESB, abaixo (figura 26) encontram-se os dados referentes aos relatórios de 1997 e 2008.

Figura 26 - Estimativas de emissão de processos industriais e queima de combustível em fontes estacionárias em Cubatão

Fonte: Adaptado de CETESB (1997) e CETESB (2008).

Nota-se que ao decorrer dos anos a tendência das indústrias é de redução de emissão para conseguinte adequação dos padrões estabelecidos por lei, os valores continuam altos. A figura 26, disposta acima, ilustra esta situação em que algumas indústrias podem chegar a emitir algo por volta de 15000 t/ano de poluentes.

Apesar da redução nas emissões ao longo dos anos, seja pela implementação de leis regulamentadoras mais rígidas, ou pela redução da produção do polo industrial, a região industrial continua obtendo resultados negativos no que se refere ao padrão de qualidade anual estabelecido pela M1 vigente no estado de São Paulo.

É notável que a redução das atividades de produção das indústrias interferiram diretamente nas emissões e conseqüentemente nas concentrações de material particulado na região.

Mediante os dados observados na figura 26, nota-se que a estação Vale do Mogi entre os anos de 2016 e 2017 conseguiu manter – se dentro da média anual esperada.

Tendo em vista todos os aspectos citados anteriormente, foram realizadas três medidas em campo com o sistema lidar, as chamadas campanhas. Tais campanhas proporcionaram realizar comparações entre as diversas ferramentas citadas na metodologia. Assim, cada campanha será chamada de episódio, ou seja, a campanha realizada em 17/08/2016 constituirá o episódio I, episódio II será a realizada em 25/08/2016 e o episódio III referir-se-á ocorrida em 15/05/2017.

5.1 Episódio I

O sistema lidar elástico utilizado opera com 3 comprimentos de onda o que possibilita observar diferentes tamanhos de aerossóis. Uma vez que as partículas tendem a espalhar comprimentos de ondas análogos ao seu tamanho (espalhamento Mie), desse modo, para realizar as observações de partículas maiores serão considerados os dados referentes ao maior comprimento de onda (WEITKAMP, 2005).

Na primeira aquisição, ocorrida em 17 agosto de 2016 na Vila Parisi o sistema lidar foi elevado em 13° e foi realizada uma varredura de 40°. Isto foi

realizado e mantido para os 3 setores analisados. A figura 27, ilustra como devem ser interpretados os dados obtidos pelo lidar elástico. Ela retrata o ângulo de elevação (Θ), o eixo y ($y = r \cdot \sin(\Theta)$) que consiste na altura alcançada nas medidas realizadas, enquanto o eixo x denota ($x = r \cdot \cos(\Theta)$) a distância atingida na horizontal, pelo mesmo.

Figura 27 - Ponto de vista do sistema lidar elástico

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (2 de fevereiro de 2019). Cubatão, Brasil. 23°50'58.42"S, 46°13'19.70"O, Altitude do ponto de visão 18 m. Globo Digital 2019. <http://www.earth.google.com> [13 de abril de 2019].

Os primeiros dados aqui apresentados são os do RCS (*Range Corrected Lidar Signal*) para os três setores, figuras 28 a 36. Todos os dados aqui apresentados foram georreferenciados tendo como o centro da figura o local no qual o lidar elástico encontrava-se durante a medida.

Figura 28 - Dados de RCS do canal 355 nm para setor 1 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46 ° 23'19.80" O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 29 - Dados de RCS do canal 532 nm para setor 1 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71\"S, 46°23'19.80\"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 30 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 1 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46 ° 23'19.80" O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 31 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 2 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46 ° 23'19.80" O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 32 - Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 2 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46 ° 23'19.80" W, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 33 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 2 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46° 23'19.80" O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 34 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 3 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46 ° 23'19.80" O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 35 - Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 3 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46°23'19.80"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 36 - Dados de RCS do canal 1064 nm para o setor 3 da Vila Parisi em 17 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'57.71"S, 46 ° 23'19.80" O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Ao comparar a intensidade do sinal nos três setores é possível observar que os valores do terceiro setor mostram-se mais intensos que os demais. Este é um indício de que há uma concentração maior de partículas neste setor do que nos outros dois (COSTA et al., 2018).

Além disso, a distribuição espacial encontra-se diferente nos três comprimentos de onda, já que o comprimento de onda interfere diretamente no tipo de espalhamento que acontece. Desta forma é possível identificar na região a presença tanto de partículas maiores quanto de menores. Observa-se também que os gráficos referentes a comprimentos de onda menores – 355 nm e 532 nm – apresentam sinais mais intensos em altitudes superiores do que os dados de 1064 nm, aos quais referem-se as partículas maiores.

Após observar valores relevantes no RCS, foram observados os dados de concentração de MP_{10} nas duas estações da CETESB na região. Os resultados para o dia 17/08/2016 estão expostos na figura 37, a qual encontra-se abaixo.

Figura 37 - Concentração média de MP_{10} para o dia 17/08/2016

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

A região destacada na imagem 37, é o período no qual estavam sendo realizadas as medidas com o sistema lidar. Durante parte da medida a estação Vila Parisi, indicada como VP na imagem, não realizou medidas, apesar disso é possível notar que o dia em questão obteve valores extremamente altos de MP_{10} tanto para a estação Vila Parisi, quanto para a estação Vale do Mogi, sinalizada como VM na

imagem 37. Verifica-se também um comportamento semelhante nas concentrações das duas estações.

O breve período em que temos simultaneamente as concentrações de material particulado e os dados do sistema lidar, observa-se que os valores de média horária na estação Vila Parisi atingiram o valor máximo de $278 \mu\text{g.m}^{-3}$, e o índice da qualidade do ar manteve-se todo o período classificado como muito ruim.

Os valores de concentração média horária e do índice de qualidade do ar encontram-se dispostos na tabela 7.

Tabela 7 - Concentração de MP10 e índice de qualidade do ar em 17/08/2016

Data/ Hora	MP10 (partículas inaláveis) $\mu\text{g.m}^3$	
	Média Horária	Índice/Qualidade
17/08/2016 - 11:00	278	121
17/08/2016 - 12:00	--	124
17/08/2016 - 13:00	165	128
17/08/2016 - 14:00	128	129
17/08/2016 - 15:00	140	130
Índice de qualidade do dia		N4 – Muito Ruim

Fonte: <https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/html-ar/dados-horarios.html>.

Quando compara-se a média de concentração do dia 17 com os demais dias do mês de agosto, nota-se que o dia em questão obteve uma das maiores concentrações para o mês. Isto fica explícito na figura 38, na qual encontram-se os valores das médias diárias para o mês de agosto.

Figura 38 - Concentração média diária para o mês de agosto/2016

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

Após realizar tal investigação foram observados aspectos que influenciam na dispersão dos poluentes, como: velocidade dos ventos e o total de água precipitável. Estas informações são relevantes, pois, a data em questão é um dia de inverno e estudos climatológicos realizados previamente indicam que a região apresenta maior presença de material particulado (MP) no inverno, em decorrência de diversos vetores meteorológicos, como: a baixa umidade, que torna o tempo residência de MP na atmosfera maior e a precipitação, sendo este um dos mecanismos de remoção de poluentes da atmosfera. Deste modo configurando a estação como desfavorável a dispersão dos poluentes (CETESB, 2002; VALARINI, 2011).

A velocidade dos ventos é um fator que exerce um papel fundamental na dispersão de poluentes, ou seja, quanto maior for a sua velocidade, maior será a difusão do poluente no ar (WHITEMAN, 2000). Para realizar tal observação foram extraídos dados do QUALAR e do GIOVANNI, sendo estes originários do MERRA - 2. Salienta-se que os valores de velocidade dos ventos recuperados do GIOVANNI, são de ventos superficiais para que houvesse um padrão para a análise (figura 39).

Figura 39 - Velocidade dos ventos para o dia 17/08/2016

Fonte: Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 inst1_2d_lfo_Nx: 2d,1-Hourly,Instantaneous,Single-Level,Assimilation,Land Surface Forcings V5.12.4.

Os valores de velocidade dos ventos obtidos na estação da CETESB são inferiores aos calculados pelo sistema de reanálise MERRA-2. A diferença pode estar relacionada a área observada. Os dados oriundos da CETESB, constituem um dado observacional pontual (os dados de velocidade e direção do vento são provenientes de um anemômetro sônico 2D) (COSTA et al., 2016). Enquanto que os valores obtidos pelo sistema de reanálise são para toda a cidade. Mesmo com alguns valores que divergem muito, é possível notar similaridades de ascensão e decréscimo de valores.

Além disso quando comparados os valores de velocidade dos ventos obtido com os métodos citados anteriormente com os valores obtidos pelo sistema lidar doppler, figura 40, há uma equivalência quando comparada a rosa dos ventos de 40 metros com os dados da CETESB. O mesmo ocorre quando comparam-se os dados obtidos a 290 metros com os dados do MERRA – 2.

Ademais, as informações provenientes das rosas dos ventos auxiliam na compreensão das diferentes intensidades nos dados de RCS, apresentados nas figuras 28 a 36. No primeiro setor há a presença de uma planta de produção de fertilizantes, o que pode indicar a origem destas partículas. No dia em questão a direção do vento era de norte a sul, o que explicaria a maior concentração de partículas nesta região mais ao sul, setor 3 (COSTA et al., 2018).

Figura 40 - Rosa dos ventos a 40 m e a 290 m em 17/08/2016

Fonte: Márcia Talita Amorim Marques, 2016.

Assim como a velocidade, é importante entender a origem das massas de ar bem como o seu destino. A relevância desta informação está relacionada ao transporte de aerossóis. Tal evento ocorre por meio das correntes de ar que circulam na atmosfera. O transporte pode atingir diferentes escalas, sejam estas regionais ou até globais (WALLACE e HOBBS, 2006).

Para isso foram realizadas retrotrajetórias e trajetórias para frente, para realizar tal investigação. Por observar-se tal fenômeno adotou-se como ponto inicial a estação Vila Parisi. Foram adotadas 4 alturas ao nível do solo 300 m, 500 m, 1000 m e 1500 m. Além disso, todas as trajetórias foram realizadas em um breve período, 3 horas.

A figura 41, mostra as retrotrajetórias das massas de ar para o episódio I, nela cada cor representa uma altura. O início das trajetórias estão sinalizadas com uma bolinha da cor da trajetória e o destino final encontra-se marcado com uma bolinha amarela.

Figura 41 - Retrotrajetória para o dia 17/08/2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 24°06'32.22"S, 47°09'40.38" W, Altitude do ponto de visão 167.90 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [17 de julho de 2018].

A retrotrajetória em questão tem como origem as cidades localizadas no planalto, sendo todas originárias do interior do estado de São Paulo. No que se refere as massas de ar, as de altura menor – 300 m e 500 m – passam por grandes centros urbanos, o que pode ser um indicio de contribuição de aerossóis de outras regiões para a cidade de Cubatão. Já as massas de altitudes superiores não passam por tais áreas.

Quanto as trajetórias para frente, nota-se uma similaridade com os dados obtidos com o sistema lidar elástico. Observa-se na figura 42 que as massas de ar que originam-se na região, movem-se em direção a uma região mais ao sul o que pode explicar o deslocamento da pluma e o sinal mais intenso no setor 3, que encontra-se ao sul também. Ressalta-se que todas as massas de ar chegaram em altitudes inferiores às de origem.

Figura 42 - Trajetória para frente em 17/08/2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 24°03'30.04"S, 45° 53'13.63" W, Altitude do ponto de visão 136.62 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [17 de julho de 2018]

Outro fator que influencia na dispersão de poluentes é a precipitação, pois este é um processo de remoção, conforme já citado neste trabalho. Ao observar os dados de precipitação originários do MERRA-2, é possível observar que os índices horários são extremamente baixos, figura 43.

Os valores apresentados para o dia em questão não excedem o valor de 32,61 kg/m². Nota-se que a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera ao longo do dia foi diminuindo, tal fenômeno pode estar relacionado com a temperatura, agosto encontra-se no inverno, período considerado o mais seco (uma vez que o período computa os índices pluviométricos baixos) e com as temperaturas mais baixas na região sudeste.¹⁷

¹⁷ <https://www.ipmet.unesp.br/4estacoes/>

Figura 43 - Média de vapor d'água precipitável para o dia 17/08/2016

Fonte: MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx:2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation, Sin -gle-Level Diagnostics V5.12.4.

5.2 Episódio II

O episódio II, teve a aquisição de dados realizada em 25 de agosto de 2016, com o sistema lidar elevado a 13° e foi realizada uma varredura de 40°. Esta primeira tomada de dados na região foi realizada em apenas 1 setor.

Assim como no episódio I, são apresentados apenas os dados de RCS, referentes a todos os canais. Além disso as aquisições foram realizadas no mesmo mês que o episódio I, com um intervalo de apenas 8 dias.

Observa-se, nas figuras 44 a 46, uma pluma de aerossóis com intensidade de sinal muito mais intensa em uma altura inferior e bem mais próxima ao equipamento. É possível identificar a presença de partículas maiores ao longo de todo alcance do equipamento mediante a sua angulação. Próximo a região de coleta de dados há uma alta circulação de veículos pesados, bem como a presença de uma indústria de insumos agrícolas.

Ressalta-se que os dados referentes ao canal 1064 nm, diferencia-se do resultado obtido nos três setores do episódio I. Neste observa-se maior intensidade em uma região mais distante e em altitudes superiores as observadas para este canal no episódio anterior.

Figura 44 - Dados de RCS do canal 355 nm para o setor 1 do Vale do Mogi em 25 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 45 - Dados de RCS do canal 532 nm para o setor 1 do Vale do Mogi em 25 de agosto de 2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"E, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Foi destacada a região na figura 47, que se refere ao período no qual estavam sendo feitas as medidas com o sistema lidar. Diferente do episódio I, neste caso temos os valores das concentrações de MP_{10} para a região analisada – Vale do Mogi -, contudo nota-se a mesma ausência de dados da Vila Parisi para a maior parte do dia. Assim como no caso anterior verifica-se um comportamento semelhante nas concentrações das duas estações.

Figura 47 - Concentração média de MP_{10} para o dia 25/08/2016

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

O período no qual foi realizada a tomada de dados com lidar elástico não foi o período de maior concentração de material particulado na região. Diferente do primeiro episódio, os valores de concentração horária de MP_{10} na estação Vale do Mogi atinge $48 \mu\text{g.m}^{-3}$, e tem o índice de qualidade dentro da classificação N1 – boa, conforme disposto na tabela 8.

Tabela 8 - Concentração de MP_{10} e índice de qualidade do ar em 25/08/2016

Data/ Hora	MP_{10} (partículas Inaláveis) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Média Horária	Índice / Qualidade
25/08/2016 - 11:00	48	24
25/08/2016 - 12:00	39	24
Índice de qualidade do dia		N1 - Boa

Fonte: <https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/html-ar/dados-horarios.html>.

Na figura 38, disposta anteriormente nos dados do episódio I, a qual encontram-se os valores das médias diárias para o mês de agosto, quando compara-se a média de concentração do dia 25 com os demais dias do mês em questão, verifica-se que o dia 25 (figura 47) alcançou uma média inferior a estabelecida como padrão de qualidade.

Os valores de velocidade dos ventos (figura 48) foram apenas os da estação da CETESB – Vila Parisi, pois não há registro desse parâmetro na outra estação no dia 25 de agosto. Assim como os valores de MP_{10} , há alguns dados faltantes, porém, o parâmetro aqui observado possui registro de dados para o período em que fora feita a campanha.

Ao observar os valores obtidos com as duas ferramentas nota-se que há apenas um ponto, às 13h, em que os valores são muito próximos. Apesar de existir uma diferença nos valores do MERRA-2 e da estação da CETESB, é possível observar uma semelhança no comportamento dos valores de ambos instrumentos.

Figura 48 - Velocidade dos ventos para o dia 25/08/2016

Fonte: Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavg1_2d_flx_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Surface Flux Diagnostics V5.12.4.

Assim como no episódio I, fora realizada aquisição de dados com o lidar doppler e foram obtidas as rosas dos ventos para 40 m e para 290 m. Os valores encontrados para 40 m, vão de encontro com os dados da CETESB, ficando entre 0 – 5 m/s. O mesmo ocorre para os dados de 290 m, quando comparados com os dados da reanálise MERRA-2.

Figura 49 - Rosa dos ventos a 40 m e a 290 m em 17/08/2016

Fonte: Márcia Talita Amorim Marques, 2016.

Neste episódio foram adotadas 4 alturas ao nível do solo para serem observadas, e o tempo utilizado é o mesmo aplicado no episódio I, 3 horas e foi utilizado como ponto inicial e final das trajetórias de massas de ar o local da campanha efetuada com o lidar.

A figura 50, mostra as retrotrajetórias das massas de ar. Assim como nas trajetórias apresentadas anteriormente, foram utilizadas as seguintes alturas para observar-se as massas de ar: 300 m, 500 m, 1000 m e 1500 m.

As retrotrajetórias retratadas abaixo tem como origem diversas cidades que encontram-se bem distantes da cidade de Cubatão. No que se refere as massas de ar, todas originam-se de uma região mais ao norte. Diferentemente dos dados obtidos em 17/08/2016, as massas de ar não atravessam grandes centros metropolitanos.

Figura 50 - Retrotrajetória 25/08/2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°42'45.95S, 46 ° 18'12.22" W, Altitude do ponto de visão 53.71 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [17 de julho de 2018]

No que concerne as trajetórias para frente, figura 51, percebe-se que houveram trajetórias bem mais curtas do que as retrotrajetórias e que tais trajetórias também não destinam-se a mesma região. As trajetórias de 1500 m e 1000 m seguem em sentido similar, tendo a massa de ar a 1000 m como destino final a região da cidade de Santos, enquanto que a de 1500 m alcança o final da cidade de Guarujá.

As trajetórias referentes às alturas inferiores (300 m e 500 m) seguem rotas em sentidos opostos as outras. A trajetória de 300 m encerra-se na região de Cubatão, a massa passa pela região da Vila Parisi. Já a 500 m sai da região do Vale do Mogi e alcança a região de planalto. O que pode apontar que a região coopera com o transporte de aerossóis para outras regiões, inclusive para o planalto.

Figura 51 - Trajetória para frente em 25/08/2016

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'46.23"S, 46°17'34.35" W, Altitude do ponto de visão 63.14 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [17 de julho de 2018]

Os valores exibidos de total de vapor d'água precipitável na atmosfera, figura 52, para o dia em questão não excedem o valor de 19,13 kg/m². Espera-se encontrar valores mais baixos tendo em vista que é um período de seca, entretanto, observa-se um comportamento diferente do observado no episódio I.

Figura 52 - Média de vapor d'água precipitável para o dia 25/08/2016

Fonte: MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx:2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4.

5.3 Episódio III

No episódio III a tomada de dados aconteceu em 15 de maio de 2017, com o sistema lidar elevado a 9º e foi realizada uma varredura mais ampla com 60º. Nele foram coletados dados de dois setores: o primeiro apresentado por meio das figuras de 53 a 55, e o segundo setor nas imagens de 56 a 58.

Apesar desta campanha ter sido realizada em maio, no outono diferentemente das demais que foram realizadas durante o inverno, os resultados obtidos foram semelhantes. Além do mais, foi possível ter uma janela de aquisições maior, o que possibilitou a realização de um melhor acompanhamento das plumas de aerossóis.

Ressalta-se que durante a análise dos dados obtidos, notou-se que ocorrera alguma interferência no canal 532 nm, pois, ele não apresenta os resultados esperados, conforme pode ser observado nas figuras 54 e 57.

O resultado obtido para o canal 355 apresenta uma distribuição espacial diferente dos demais episódios. Neste terceiro é possível observar que há a presença de partículas muito pequenas em altitudes maiores. Tanto no setor 1 (figura 53) quanto no setor 2 (figura 56).

Já para o canal 1064 nm no setor 1, (figura 55), a intensidade do sinal mostra-se forte sobre o local onde está alocada a indústria de insumos para a agricultura. Por meio do georreferenciamento, percebe-se que a pluma está sobre uma área descampada a qual não há asfalto ou algo que evite a ressuspensão das partículas do solo.

Já no setor 2 (figura 58), encontra-se uma dispersão desigual, formando uma pluma bem acentuada na região de mata. Entretanto não é possível afirmar se ocorreu a formação de aerossóis secundários ou se estes são biogênicos, devido à forte influência das fontes antrópicas próximas, como: indústria de fertilizantes, insumos agrícolas, veículos pesados e ressuspensão de solo. Além de todos os fatores citados anteriormente, pode ocorrer a interferência das emissões de MP₁₀ pela siderúrgica, pois, os dados do sistema lidar encontram-se na direção do de tal indústria.

Figura 53 - Dados de RCS do canal 355 nm para os setor 1 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 54 - Dado de RCS do canal 532 nm para os setor 1 do Vale do Mogi em maio de 2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 55 - Dados de RCS do canal 1064 nm para os setor 1 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 56 - Dados de RCS do canal 355 nm para os setor 2 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 57 - Dados de RCS do canal 532 nm para os setor 2 do Vale do Mogi em 17 de maio de 2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Figura 58 - Dados de RCS do canal 1064 nm para os setor 2 do Vale do Mogi em 15 de maio de 2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'51.60"S, 46°21'56.68"O, Altitude do ponto de visão 6.01 km. Globo Digital 2018. <http://www.earth.google.com> [15 de julho de 2018].

Ao comparar a intensidade no sinal nos dois setores é possível observar que os valores assemelham-se, bem como as plumas formadas na região. A distribuição espacial observada com o sistema mostra a presença de aerossóis a altitudes mais baixas, entretanto, neste caso foi possível observar sinal em altitudes maiores em relação aos demais casos.

Após observar-se a distribuição dos aerossóis por meio dos dados RCS, foram observados os dados de concentração de MP_{10} nas duas estações da CETESB da região industrial. Os resultados para o dia 15/05/2017 são apresentados na figura 59.

Figura 59 - Concentração média de MP_{10} para o dia 15/05/2017

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

A região destacada na imagem 59, é o período no qual foram realizadas as medidas com o sistema lidar. Neste período observa-se que as concentrações na região em questão (Vale do Mogi) eram baixas não excedendo os $29 \mu\text{g.m}^{-3}$. Entretanto a estação Vila Parisi registrou o maior pico do dia durante o dia 15, que foi de $242 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Quando confrontados os dados de índice de qualidade do ar obtidos para o dia 15 de maio, nota-se que durante o período em que estava ocorrendo a aquisição de dados com o sistema lidar elástico, tais índices encontravam-se classificados como moderada. Já o índice final no dia era classificado como boa, tais informações encontram-se dispostas na tabela 9.

Tabela 9 - Concentração de MP₁₀ e índice de qualidade do ar em 15/05/2017

Data/ Hora	MP ₁₀ (partículas Inaláveis) µg/m ³	
	Média Horária	Índice/ Qualidade
15/05/2017 - 11:00	112	64
15/05/2017 - 12:00	98	64
15/05/2017 - 13:00	242	69
Índice de qualidade do dia	N1 - Boa	

Fonte: <https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/html-ar/dados-horarios.html>.

Outro fator que destaca-se nos dados das duas estações é que em momentos onde a concentração de MP₁₀ diminui na estação do Vale do Mogi, ocorre um aumento na estação da Vila Parisi.

Ao comparar a média de concentração do dia 15 com os demais dias do mês de maio, nota-se que o dia em questão obteve uma das menores concentrações para o mês, para ambas estações apresentadas. Isto fica explícito na figura 60, na qual encontram-se os valores das médias diárias para o mês de maio.

Figura 60 - Concentração média diária para o mês de maio/2017

Fonte: Autor da dissertação, 2018.

Para este caso os valores de velocidade dos ventos também foram extraídos da estação da CETESB – Vila Parisi, para manter o mesmo critério de

análise aplicado nos episódios anteriores. Na figura 61, encontram-se os valores de velocidade dos ventos obtidos para o dia 15 de maio de 2017.

Figura 61 - Velocidade dos ventos para o dia 15/05/2017

Fonte: Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavg1_2d_flux_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Surface Flux Diagnostics V5.12.4.

Nota-se que os valores horários de velocidade dos ventos estão maiores em relação aos outros casos apresentados neste trabalho. Este aumento na intensidade dos ventos pode estar ligado a estação do ano, outono, a qual é distinta da utilizada nos demais episódios. Segundo EMÍDIO (2018) o outono é caracterizado pela maior frequência de ventos e maior intensidade destes.

No que refere-se aos dados das diferentes plataformas, eles divergem não existindo um momento em que os valores se aproximem. Além disso observa-se que há um comportamento reverso, ou seja, em quanto há um aumento nos valores do MERRA, os valores obtidos pela estação de monitoramento estão em decréscimo.

As massas de ar, referentes às retrotrajetórias, neste caso têm como origem uma região mais ao sul (figura 62), desse modo, pode-se ocorrer o transporte de aerossóis e outros poluentes da região da Vila Parisi para a região de vale. Todas as quatro alturas chegaram ao destino final em altitudes superiores as iniciais.

Figura 62 - Retrotrajetórias para o dia 15/05/2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 24°05'12.74"S, 47°13'21.25" W, Altitude do ponto de visão 131.26 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [17 de julho de 2018]

No que compete as trajetórias para frente, figura 63, diferente do que foi observado nos episódios anteriores, as massas de ar não seguem em sentido sul, leste ou oeste, todas seguem em sentido norte, por um caminho semelhante aos das massas que chegaram a região. As altitudes de todas as trajetórias ao chegarem em seu destino final são inferiores as iniciais.

Figura 63 - Trajetória para frente em 15/05/2017

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5487. (10 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°43'32.60"S, 46°36'21.80" W, Altitude do ponto de visão 35.23 km. Globo Digital 2016. <http://www.earth.google.com> [17 de julho de 2018]

Os valores apresentados para o dia em questão na figura 64 não ultrapassam o valor de $26,86 \text{ kg/m}^2$. Quando compara-se a média do dia 15/05 com os demais dias analisados, observamos que o dia 17/08 supera o dia em questão. Percebe-se também que a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera ao longo do dia foi diminuindo. Tal evento pode ser explicado com base no seguinte fato: assim como o inverno, o outono propicia a presença de nevoeiros e de névoa úmida durante a madrugada e início da manhã, especialmente nas regiões de planalto, serra e vales, sendo este último o contexto da região observada (EMÍDIO, 2018).

Figura 64 - Média de vapor d'água precipitável para o dia 15/05/2017

Fonte: MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx:2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4.

6 CONCLUSÕES

Para a realização deste trabalho foram aplicadas diferentes técnicas, como o sensoriamento remoto, por meio da aplicação do sistema lidar e coleta de dados de satélites; análise de dados de qualidade do ar disponibilizados pela CETESB e investigação das trajetórias de massa de ar com o modelo HYSPLIT.

Primeiramente foram estudados os dados de qualidade do ar, os quais possibilitaram a constatação de que a cidade de Cubatão continua a sofrer com as emissões de poluentes atmosféricos. Isto fica claro quando são analisados os dados de ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar. O poluente mais problemático na região continua sendo o MP₁₀, ao analisar as médias anuais este poluente ultrapassou o limite anual $40\mu\text{g.m}^{-3}$ em todas as estações de monitoramento localizadas na região industrial.

Ao observar os dados de distribuição temporal do MP₁₀ nas estações ao longo dos anos, foi identificado que a região mais problemática é a área industrial, destacando-se o bairro Vila Parisi. Entretanto, ao verificarmos os dados ao longo dos anos, percebe-se que o encerramento das atividades da siderúrgica na cidade interferiu positivamente na qualidade do ar. Ao comparar o ano antecessor ao encerramento das atividades e o ano subsequente, observamos uma queda abrupta nos valores de concentrações diárias e ultrapassagens.

Ao investigar os dados obtidos com o sistema lidar, foi possível identificar que os aerossóis em Cubatão encontram-se dispersos de modo mais homogêneo na região do Vale do Mogi. Sendo que nas duas campanhas realizadas neste local, foram observados comportamentos semelhantes das plumas. Estas por sua vez indicam que a sua formação transcorre mediante: a interferência das atividades de indústrias próximas e circulação de veículos pesados na região, a qual pode cooperar para a ressuspensão de aerossóis e emissão desses devido a queima de combustível.

Na região da Vila Parisi nota-se que as regiões alocadas ao norte possuem semelhanças nas concentrações de aerossóis, sendo que o mesmo não ocorre no terceiro setor. Nele é possível observar uma maior concentração de aerossóis. O que traz indícios de transporte de aerossóis de uma região para outra.

Quanto a análise da velocidade dos ventos, realizada por meio de duas técnicas diferentes (estações de monitoramento da CETESB e dados do MERRA-

2), os resultados obtidos não estavam dentro do esperado, ou seja, os dados provenientes da reanálise divergiam dos dados provenientes das estações, contudo havia um comportamento semelhante de ascensão e redução das velocidades. Tal fato ocorreu em todos os casos analisados neste trabalho. As discrepâncias podem ser resultantes da resolução espacial, pois, o MERRA-2 não permite selecionar um ponto específico. Portanto foi selecionada toda a cidade de Cubatão. Tal fato também é decorrente dos ajustes realizados automaticamente nas coordenadas geográficas.

Os valores de vapor d'água precipitável em quase todos os casos, está em conformidade com o que se espera para dias outonais e inverniais. Contudo a realização de estudos com sistemas de sensoriamento remoto capazes de identificar o vapor d'água seriam ideais para realizar estudos comparativos com os dados do sistema MERRA-2.

A investigação realizada por meio do cálculo das trajetórias das massas de ar tanto para frente, quanto para trás (retrotrajetórias), proporcionou identificar que pode ocorrer a influência de outras regiões na área estudada. Além do fato de o transporte de poluentes ocorrer dentro da própria cidade, conforme visto no episódio III, no qual verificou-se que todas as trajetórias das massas de ar passavam sobre a região da Vila Parisi. Também foi possível identificar que as massas de ar originárias na cidade de Cubatão chegam a outras cidades da baixada santista, podendo ocasionar o transporte de poluentes entre as cidades da região.

Tendo em vista tais resultados, principalmente os relacionados ao transporte de massas de ar e a velocidade dos ventos, seria relevante a elaboração de um estudo maior dos ventos, podendo ser utilizado um sistema de sensoriamento remoto (lidar doppler) na cidade de Cubatão.

Em síntese, é possível afirmar que a combinação destas diversas ferramentas nos possibilita observar e compreender a dinâmica da dispersão de poluentes nesta região, bem como, a identificação das principais fontes emissoras.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, I. T.; **A poluição Atmosférica por Material Particulado na Mineração a Céu Aberto**; Dissertação (Mestre em Engenharia); Escola Politécnica da Universidade de São paulo; 187p.; São Paulo, SP; 1999. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31012002-170628/pt-br.php>>. Acesso: 18 de julho de 2016.

ALVES, C. **Aerossóis atmosféricos: Perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica**. Quimica Nova, v. 28, n. 5, p. 859– 870, 2005.

ATTUX, R. **Tópico 8 – Propriedades Ópticas – Parte I**. Primeiro semestre/2017. Disponível em: < <http://www.dca.fee.unicamp.br/~attux/topico8.pdf/> >. Acesso em 15 de setembro de 2018.

BERRICK *et al*: **GIOVANNI: WEB SERVICE WORKFLOW-BASED DATA VISUALIZATION AND ANALYSIS SYSTEM**. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 47, N° 1, Janeiro 2009.

BOYOUK, N.; LÉON, J. F.; DELBARRE, H.; PODVIN, T.; DERRO, C. **Impact of the mixing boundary layer on the relationship between PM_{2.5} and aerosol optical thickness**. Atmospheric Environment, 44, 271-277, 2010.

BRASIL - RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR - Publicada no DOU, de 22 de agosto de 1990, Seção 1, páginas 15937-15939.

CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2013**. CETESB. - São Paulo: 2014. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/> >. Acesso em 18 de julho de 2018.

CETESB. **Relatório de qualidade do ar do Estado de São Paulo 2001**. — São Paulo : 2002. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/> >. Acesso em 18 de julho de 2018.

CETESB. **Relatório de qualidade do ar do Estado de São Paulo 2008**. — São Paulo : 2009. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/> >. Acesso em 18 de julho de 2018.

CETESB. **QUALAR: relatórios e consultas**. Disponível em:<<http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>>. Acesso em: 7 de fevereiro de 2018.

COSTA, R. F.; **Estudos das Propriedades Ópticas dos Aerossóis no Estado de São Paulo com a Técnica Lidar**; Dissertação, Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais; IPEN/USP, São Paulo, 2010.

COSTA, R. F.; **Sensoriamento Remoto a Laser de Aerossóis em uma Refinaria de Petróleo**; Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais); Energéticas e Nucleares-IPEN, Universidade de São Paulo; São Paulo, SP; 117p.; 2015.

COSTA, R. F.; BOURAYOU, R.; LANDULFO, E.; GUARDANI, R.; VESELOVSKII, I.; STEFFENS, J. **Stand-off mapping of the soot extinction coefficient in a refinery flare using a 3-wavelength elastic backscatter lidar**, Proc. SPIE 8894, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IX, 88940P (22 October 2013); doi: 10.1117/12.2027240; <https://doi.org/10.1117/12.2027240>

COSTA, R. F.; MARQUES, M. T. A.; LOPES, D. S.; GUARDANI, M. L. G.; MACEDO, F. M.; LANDULFO, E.; GUARDANI, R. **Monitoring the environmental impact of aerosol loading and dispersion from distinct industrial sources in Cubatao, Brazil, using a scanning lidar**, Proc. SPIE 10006, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XII, 1000608 (24 October 2016); doi: 10.1117/12.2242069; <https://doi.org/10.1117/12.2242069>

COSTA, R.F.; MARQUES, M. T. A.; MACEDO, F. M.; ANDRADE, I.S.; ARAUJO, E.C.; CORREA, T.; SALANI, M. H. G. A.; LOPES, D. S.; GUARDANI, M. L.G.; LANDULFO, E.; GUARDANI, R. **Monitoring the industrial sources of aerosol in cubatao, brazil, using a scanning elastic lidar and a lidar doppler**. ILRC 28. EPJ Web of Conferences 176, 04011 (2018) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817604011>.

EMÍDIO, Z. P. O. **Estações do ano**. 2018. Disponível em: < <https://www.ipmet.unesp.br/4estacoes/#>>. Acesso em: 04/01/2019

Emplasa. **Região Metropolitana da Baixada Santista**. 2018. Disponível em:< <https://www.emplasa.sp.gov.br/RMBS>>. Acesso em: 15 de julho de 2018.

ESTADO DE SÃO PAULO - Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013 - Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas - Publicada no DO – Estado de São Paulo, de 24 de abril 2013, Seção 1, páginas 1- 4.

ESTADO DE SÃO PAULO - Decreto n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976. - Aprova o Regulamento da Lei n.º 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente - Publicada no DO – Estado de São Paulo, de 09 de setembro de 1976, Seção 1, páginas 4-18.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. p. 32, 2005.

GELARO, R. *et al.* **The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)**. Journal of climate: volume 30. 15 de Julio de 2017. P. 5419 – 5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1

GIOVANNI. **The Bridge Between Data and Science v 4.26**. Disponível em:< <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), **MERRA-2 inst1_2d_lfo_Nx: 2d,1-Hourly,Instantaneous,Single-Level,Assimilation,Land**

Surface Forcings V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Acesso em: (01/12/2018), 10.5067/RCMZA6TL70BG.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), **MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx:2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4**, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Acesso em: (01/12/2018), 10.5067/VJAFPLI1CSIV

GOOGLE EARTH. V 7.3.2.5487 2018. Disponível em <<https://www.google.com.br/earth/>>

IBGE. **Cubatão**. Disponível em:< <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/cubatao/panorama>>. Acesso em: 15 de julho de 2018.

JACOB, D. J. **Introduction to Atmospheric Chemistry**. Princeton University Press, 1999.

JACOBSON, M. Z. **Atmospheric Pollution: History, Science and Regulation**. Cambridge University Press, 2002.

KASTING, J.F. 1993. **Earths's early atmosphere**, Science, 259, 920-926

KOVALEV, W. A.; EICHINGER, W. E.; **Elastic Lidar: theory, practice and analysis methods**. 1st. Ed. New Jersey: Wiley-Interscience Publication, 2004.

LEVIN, N. **Fundamentals of remote sensing**. Trieste: International Maritime Academy, 1999.

MEDEIROS, S.; **Química Ambiental** . 3ª. ed.; Revista Ampliada, 2005. 122 p.; Recife.

PIRES, F. **“Vale da morte” foi o símbolo de Cubatão**. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/brasil/2570976/vale-da-morte-foi-o-simbolo-de-cubatao>>. Acesso em: 7 de março de 2017

PITTS, B. J. F.; PITTS, J. N., Jr. **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere Theory, Experiments, and Applications**. Academic press, 2000.

PÖSCHL, U.; SHIRAIWA, M. **Multiphase Chemistry at the Atmosphere – Biosphere Interface Influencing Climate and Public Health in the Anthropocene**. Chem. Rev., 2015, 115 (10), p 4440–4475. DOI: 10.1021/cr500487s

Rienecker, M. M.; e Co autores, 2008: **The GEOS-5 Data Assimilation System - Documentation of versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0**. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, Vol. 27, NASA Tech. Rep. NASA/TM-2008-104606. Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Rienecker369.pdf>. Acesso em: 24 de dezembro de 2018.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N.; ***Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change***; 2 ed., published by Willey & Sons, Inc.; New Jersey, USA, 2006.

VALARINI, S. ***Caracterização de Material Particulado em Cubatão***. Dissertação, Mestre em Ciências – Instituto de Astronomia, Geofísica e ciências atmosféricas. Universidade de São Paulo, 2011

WEITKAMP, C.; ***Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere***. 1st. Ed. New York: Springer, 2005.

WHITEMAN, C. D. ***Mountain meteorology fundamentals and applications***. Oxford University Press. New York: 2000.

WU, W.; ZHA, Y.; ZHANG, J.; GAO, J.; HE, J. ***A temperature inversion-induced air pollution process as analyzed from Mie Lidar data***. Science of the Total Environment. 479-480, 102-108, 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**