INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Caracterização das propriedades ópticas de partículas inaláveis na cidade de
Cubatão - SP

ELAINE CRISTINA ARAÚJO

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Landulfo

São Paulo
(2019)

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Caracterização das propriedades ópticas de partículas inaláveis na cidade de
Cubatão - SP

ELAINE CRISTINA ARAÚJO

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Landulfo

Versão Corrigida

São Paulo
(2019)

Auxílio: Research Centre For Gas Innovation - RCGI projeto 9.

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

Araújo, Elaine Cristina. ***Caracterização das propriedades ópticas de partículas inaláveis na cidade de Cubatão – SP. 2019.*** --p Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP. São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>.

Araújo, Elaine Cristina

Caracterização das propriedades ópticas de partículas inaláveis na cidade de Cubatão – SP/ Elaine Cristina Araújo.

Orientador Eduardo Landulfo. São Paulo, 2019. 108 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. Partículas inaláveis. 2. LIDAR. 3. Expoente de Ångström .
4. AOD.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Elaine Cristina Araújo

Título: Caracterização das propriedades ópticas de partículas inaláveis na cidade de Cubatão - SP.

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 _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe
Sônia, minha avó Leonor (*in memoriam*)
e minha afilhada Maryana, mulheres de
muita coragem e fibra.

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente, minha mãe Sonia e meus irmãos Du e Nenê, pois sem o apoio e a acolhida deles, eu não conseguiria chegar até esta fase, deixo também a minha gratidão ao meu avô Expedito, que mesmo não estando mais em posse de suas faculdades mentais em muito dos seus dias, mesmo assim me apoia em tudo que faço.

Gostaria de expressar também minha gratidão à minha afilhada Mary, que sempre faz dos meus dias mais leves, com sua juventude em demasia, além dos primos e familiares que acompanharam esta jornada.

Às minhas amigas de FATEC, que levarei pra vida toda, Bel, Fe, Mare, Thaís e Gigi, pois sem vocês nada disso nem teria iniciado. Muito obrigada, em especial à Bel e a Fe, minhas companheiras de carona e de cantoria para espantar o sono durante as tantas idas e vindas da Baixada até o IPEN, obrigada por me aguentarem, sei que não é fácil.

Ao meu orientador, dr. Eduardo Landulfo, por sempre me conduzir e instruir da melhor maneira durante estes anos.

Ao professor Guardani, por todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos de grupo, Antônio, Fábio, Jonatan e Gregori por toda cooperação para que este trabalho acontecesse, pelos conselhos e principalmente pelo incentivo, a ajuda de vocês foi essencial em diversos momentos.

À dra. Renata Costa, por toda paciência desde o início da IC até esta fase final.

Às minhas amigas Cris, Mana, Gi, Geovana, Mari e Lis, pelos muitos momentos em que tiveram compreensão, principalmente por eu não poder estar presente como antes.

Ao Research Centre For Gas Innovation - RCGI projeto 9, pelo apoio financeiro.

Por fim e não menos importante agradeço a todos que de forma direta ou indireta colaboraram para execução deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Araújo, Elaine Cristina. ***Caracterização das propriedades ópticas de partículas inaláveis na cidade de Cubatão - SP***. 2018. --p Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP. São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>.

Os níveis de poluição do ar, tanto mundialmente, como no Brasil, principalmente em grandes metrópoles como São Paulo, dentre outras capitais e cidades brasileiras são altos e acima do que se é esperado para uma boa qualidade do ar. Uma das cidades brasileiras que ficou conhecida nacionalmente e até mundialmente pelos altos níveis de Poluentes foi Cubatão. Localizada no estado de São Paulo, a 57 km da capital do estado, Cubatão ainda tem altos níveis de Poluentes, entre eles o Material Particulado, o qual é um dos mais presentes. Dentre as classificações do material particulado estão as partículas inaláveis (MP_{10}) e partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$), estes são assim classificados de acordo com seus diâmetros aerodinâmicos. Tendo em vista os fatos citados acima, este trabalho propõe caracterizar as propriedades ópticas das partículas inaláveis na cidade de Cubatão – SP. Para tal foram utilizados dados de concentração das partículas inaláveis da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB e as informações a respeito de perfil espacial foram observadas pela técnica de sensoriamento remoto – *Light Detection and Ranging* – LIDAR por meio de campanhas realizadas em agosto de 2016. Também foram analisados dados de *Aerosol Optical Depth* – AOD extraídos da plataforma - *Goddard Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure* – GIOVANNI, a qual contém informações de satélites, que foram usadas para indicar o tamanho das partículas detectadas na região de Cubatão. Do mesmo modo verificou-se os dados do Expoente de Ångström que são distribuídos pela plataforma GIOVANNI.

Palavras-chave – Partículas inaláveis – LIDAR – Expoente de Ångström – AOD

ABSTRACT

Araújo, Elaine Cristina. ***Characterization of the optical properties inhalable particle in the city of Cubatão - SP***. 2018. --p Dissertation (Master in Nuclear Technology) - Institute of Energy and Nuclear Research - IPEN-CNEN / SP. Sao Paulo. Available at: <<http://www.teses.usp.br>>.

The levels of air pollution, both globally and in Brazil, especially in large metropolises such as São Paulo, among other Brazilian cities and capitals are high and above what is expected for good air quality. One of the Brazilian cities that was known nationally and even worldwide by the high levels of Pollutants was Cubatão. This city is located in the state of São Paulo, 57 km from the state capital. Cubatão still has high levels of Pollutants, among them the Particulate Material, which is one of the most present. Among the classifications of the particulate material are inhalable particles (PM_{10}) and fine inhalable particles ($PM_{2.5}$), these are thus classified according to their aerodynamic diameters. In view of the facts mentioned above, this paper proposes to characterize the optical properties of inhalable particles in the city of Cubatão - SP. For this purpose, the inhalable particulate concentration data of the Environmental Company of the State of São Paulo - CETESB were used and the information regarding the spatial profile was observed by the remote sensing technique - Light Detection and Ranging - LIDAR through campaigns carried out in August, Aerosol Optical Depth - AOD data from the Goddard Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure (GIOVANNI) platform, which contains information from satellites, were used to indicate the size of the particles detected in the Cubatão region. In the same way the data of the Ångström exponent, distributed by GIOVANNI platform was verified.

Keywords - Inhalable particles - LIDAR - Ångström exponent - AOD

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Perfil vertical de temperatura da atmosfera	22
Figura 3.2 – Interação radiação-atmosfera	23
Figura 3.3 – Espalhamento Mie	25
Figura 3.4 – Mapa Global AOD agosto de 2016	27
Figura 3.5 – Sensoriamento remoto Passivo e Ativo	30
Figura 3.6 – Constelação de Satélites NASA	32
Figura 3.7 – Satélite Terra (Representação gráfica).....	33
Figura 3.8 – Representação Gráfica do satélite Aqua	34
Figura 3.9 – Esquema dos instrumentos a bordo do satélite Aqua.....	35
Figura 3.10 – Configuração de sistemas LIDAR.....	41
Figura 3.11 – Diagrama de um sistema LIDAR coaxial genérico.....	42
Figura 3.12 – Diâmetro aerodinâmico da partícula	44
Figura 4.1 – Mapa do Estado de São Paulo, região metropolitana da Baixada Santista e a cidade de Cubatão.....	53
Figura 4.2 – Áreas de estudo e estações CETESB	54
Figura 4.3 – Amostragem I, Ecopátio - Cubatão.....	55
Figura 4.4 – Amostragem II, Vale do Mogi.....	56
Figura 4.5 – LIDAR	57
Figura 4.6 – Diagrama Sinal Retroespalhado Corrigido.....	58
Figura 4.7 – Lidar Doppler, Windcube V2.....	59
Figura 4.8 – Especificações técnica do sistema MODIS.....	60
Figura 4.9 – Fluxograma para recuperação de propriedades ópticas de aerossóis sobre superfícies brilhantes	62
Figura 5.1 – Gráfico Média Aritmética Anual de MP10	64
Figura 5.2 – Gráfico Concentração de MP10 - 2016.....	64
Figura 5.3 – Panorama geral da vista do LIDAR	65
Figura 5.4 – Amostragem I – 17/08/2016.....	65
Figura 5.5 – Média diária de concentração de MP10 – 17/08/2016.....	67
Figura 5.6 – “Ponto de vista” LIDAR região Ecopátio	68
Figura 5.7a, 5.7b e 5.7c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 1.....	69
Figura 5.8a, 5.8b e 5.8c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 2.....	70
Figura 5.9a, 5.9b e 5.9c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 3.....	72
Figura 5.10a, 5.10b e 5.10c – Coeficiente de extinção para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 3	74
Figura 5.11 – Expoente de Ångström (355/1064 nm) – Setor 3.....	76
Figura 5.12 – Expoente de Ångström (532/1064 nm) – Setor 3.....	77
Figura 5.13 – Expoente de Ångström (355/532 nm) – Setor 3.....	77
Figura 5.14 - Gráfico LIDAR georeferenciado e Rosa dos ventos – Amostragem I	79
Figura 5.15 – Panorama do ponto de amostragem	80
Figura 5.16 – Média diária de concentração de MP10 – 25/08/2016.....	81
Figura 5.17 – “Ponto de vista” LIDAR região Vale do Mogi	82

Figura 5.18a, 5.18b e 5.18c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Região Vale do Mogi	83
Figura 5.19 - Coeficiente de extinção para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm).....	85
Figura 5.20 – Expoente de Ångström (355/1064 nm)	87
Figura 5.21 – Expoente de Ångström (532/1064 nm)	87
Figura 5.22 – Expoente de Ångström (355/532 nm)	88
Figura 5.23 – Gráfico georreferenciado LIDAR e Rosa dos ventos – Amostragem II	89
Figura 5.24 – Série temporal, de 2010 até 2017 da AOD para a cidade de Cubatão (Satélite Terra e Aqua)	90
Figura 5.25 – Série temporal, ano de 2016 da AOD para a cidade de Cubatão (Satélite Terra)	91
Figura 5.26 – AOD recuperado da plataforma GIOVANNI para o mês de agosto de 2016 (Satélite Terra)	92
Figura 5.27 – Série temporal, de 2010 até 2017 do AE para a cidade de Cubatão (Satélite Terra e Aqua)	93
Figura 5.28 – AE recuperado da plataforma GIOVANNI para o mês de agosto de 2016 (Satélite Terra)	94
Figura 5.29 – AE recuperado da plataforma GIOVANNI para o mês de agosto de 2016 – Satélite Terra	95
Figura 5.30 – AOD em função do Expoente de Ångström recuperados da plataforma GIOVANNI para o ano de 2016 – Satélite Terra	96
Figura 5.31 – AOD em função do Expoente de Ångström recuperados da plataforma GIOVANNI para o ano de 2016 – Satélite Aqua	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do ar (seco e sem poluentes).....	21
Tabela 2 – Qualidade do ar seus efeitos à saúde humana.....	48
Tabela 3 – Padrões qualidade do ar segundo Decreto Estadual nº 59113/2013..	52
Tabela 4 – Índice de qualidade do ar durante a amostragem I.....	66
Tabela 5 – Índice de qualidade do ar durante a amostragem II.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

A-train – *Afternoon Constellation*

AE - *Ångström Exponent*

AIRS - *Atmospheric Infrared Sounder*

AMSR-E - *Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*

AMSU-A - *Advanced Microwave Sounding Unit*

AOD - *Aerosol Optical Depth*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

CALIPSO - *Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations*

CERES - *Clouds and Earth's Radiant Energy System*

CETESB - *Companhia Ambiental do Estado de São Paulo*

CO - *Monóxido de Carbono*

CONAMA - *Conselho Nacional de Meio Ambiente*

EPA - *United States Environmental Protection Agency – US*

GCOM-W1 - *Global Change Observation Mission-Water*

GIOVANNI - *Goddard Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure*

HSB - *Humidity Sounder for Brazil*

IBAMA - *Instituto Brasileiro do Meio Ambiente*

LEAL – *Laser Environmental Applications Laboratory*

LIDAR - *Light Detection and Ranging*

MISR - *Multi-angle Imaging Spectroradiometer*

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

MOPITT - *Measurements of Pollution in the Troposphere*

MP - *Material Particulado*

MP₁₀ - *Material Particulado diâmetro entre 2,5 e 10µm*

MP_{2,5} - *Material Particulado diâmetro menor que 2,5µm*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NEO – *Nasa Earth Observation*

NMHC - Hidrocarbonetos não-metânicos

NO – Monóxido de nitrogênio

NO₂ - Dióxido de Nitrogênio

NO_x - Óxidos de nitrogênio

O₃ - Ozônio

OCO-2 - *Orbiting Carbon Observatory*

OMS - Organização Mundial de Saúde

QUALAR - Sistema De Informações da Qualidade do Ar

REM – Radiação Eletromagnética

SO₂ - Dióxido de Enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVOS.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Atmosfera e seus constituintes.....	21
3.2 Espalhamento e Absorção	23
3.2.1 Espalhamento Elástico	24
3.2.1.1 Espalhamento Mie	24
3.2.1.2 Espalhamento Rayleigh.....	25
3.2.3 Coeficiente de Extinção	25
3.2.4 Profundidade Óptica do Aerossol – AOD	26
3.2.5 Expoente de Ångström (AE)	28
3.3 Sensoriamento Remoto.....	29
3.3.1 Monitoramento Atmosférico – Satélites	31
3.3.1.1 Satélite Terra	32
3.3.1.2 Satélite Aqua	34
3.4 LIDAR.....	35
3.4.1 Equação Lidar.....	36
3.4.2 Principais componentes de um sistema LIDAR	40
3.4.2.1 Transmissor.....	40
3.4.2.2 Receptor	40
3.4.2.3 Detector	40
3.4.3 Configuração de sistemas LIDAR.....	41
3.5 Poluentes	42
3.5.1 Material Particulado	43
3.5.2 Processos de Formação do Material Particulado	44
3.5.2.1 Processos de Formação Natural do Material Particulado.....	45
3.5.2.2 Processos de Formação Antrópica de Material Particulado	45
3.5.3 Efeitos do Material Particulado sobre o Meio Ambiente	45
3.5.4 Efeitos do Material Particulado sobre a Saúde Humana	46
3.5.5 Legislações Vigentes no Brasil e no Mundo	48
3.5.6 Legislação no Estado de São Paulo	50
4 MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1 Caracterização da área de estudo	53
4.2 CETESB	56
4.3 LIDAR Elástico	57

4.3.1 RCS	58
4.3.2 LIDAR Doppler.....	58
4.4 Plataforma GIOVANNI	59
4.4.1 MODIS.....	60
4.4.1.1 Deep Blue.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1 Dados CETESB.....	63
5.2 Amostragem I – Vila Parisi – 17/08/2016	65
5.3 Amostragem II - Vale do Mogi – 25/08/2016	80
5.4 Dados GIOVANNI	90
5.4.1 AOD.....	90
5.4.2 Expoente de Ångström	92
6 CONCLUSÕES.....	97
6.1 Sugestão Para Futuros Trabalhos.....	99
7 REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE I – MAPAS MODIS EM PYTHON	106
APÊNDICE II – TRABALHOS PUBLICADOS.....	108

1 INTRODUÇÃO

A identificação de partículas inaláveis se faz necessário devido o quão nocivo à saúde estas partículas podem ser. Em um caso citado por SPIRO e STIGLIANI, 2009, por volta dos anos 70 fora realizado um estudo com voluntários, de modo que foi possível concluir que o aumento de partículas finas estava relacionado com a mortalidade de jovens na época.

Com o intuito de amenizar problemas como o citado no parágrafo acima, foram criadas legislações e órgãos públicos tanto no Brasil quanto no exterior, para monitorar e controlar os poluentes que causavam danos à saúde da população (DERÍSIO, 2012). Porém mesmo o controle sendo constante, atualmente algumas cidades ainda possuem índices de poluição não tão satisfatórios quando se trata de saúde pública. Este é o caso de Cubatão, localizada a 57 km da capital do estado de São Paulo, com uma população estimada em 118720 (censo 2010)¹ e densidade demográfica de 830,91 hab./km².

Segundo dados de três estações de monitoramento da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)², localizadas em Cubatão, entre 2010 e 2017 houveram máximos de concentração que extrapolaram o Padrão de Qualidade do Ar estipulado pelo órgão.

Dentre os diversos poluentes controlados pela CETESB e outros órgãos de monitoramento da qualidade do ar, o material particulado é apontado como um dos poluentes mais preocupantes, devido a relação direta a saúde do ser humano (POPE, 2004). Este material particulado é atualmente, subdividido em: MP₁₀, que é denominado como partículas inaláveis e MP_{2,5} que é intitulado de partículas inaláveis finas. Esta definição se torna importante segundo a *UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY* – US EPA³, pois dependendo da faixa em que se encontra o material particulado, o mesmo terá comportamentos distinto

¹ <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/cubatao/panorama>

² <https://cetesb.sp.gov.br>

³ <https://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.particle>

na atmosfera, sendo assim afetará o meio ambiente e a saúde do ser humano de uma maneira diferente.

Sabendo da importância da identificação destes tipos de partículas, sobretudo por elas estarem diretamente relacionados à saúde e ao bem estar dos seres vivos, este trabalho tem como finalidade utilizar algumas tecnologias que permitem fazer uma análise óptica, a qual permitirá caracterizar as partículas inaláveis da região de Cubatão, tais como: a técnica *Light Detection and Ranging* – Lidar, que nos permite traçar um perfil temporal e espacial dos aerossóis presentes na região. A plataforma - *Goddard Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure* – GIOVANNI, a qual contém informações de satélites, que traz dados acerca de *Aerosol Optical Depth* - AOD e de Expoente de Ångström - AE, ambos importantes para a caracterização das partículas detectadas na região de Cubatão.

Também foram analisados dados da plataforma online denominada Sistema de Informações da Qualidade do Ar - QUALAR⁴, de responsabilidade da CETESB. Estas informações ajudaram a traçar um perfil anual e também diário das concentrações partículas do tipo MP₁₀.

Por fim, os dados coletados em campanhas realizadas com LIDAR foram utilizados também como fonte para uma análise de Expoente de Ångström, complementando assim as informações retiradas da plataforma GIOVANNI.

⁴ <https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo caracterizar as partículas inaláveis da região de Cubatão-SP. Tal análise será realizada mediante a utilização de dados: da CETESB, de um sistema LIDAR elástico e por informações da plataforma GIOVANNI.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Atmosfera e seus constituintes

A atmosfera terrestre é composta de várias camadas, porém a camada que mais se aproxima da superfície terrestre é a Troposfera. Tal camada possui uma extensão que varia entre 10-16 km. Na troposfera se encontra a maior parte da massa atmosférica (~90%), ou seja, a massa dos constituintes (da composição química) que se é conhecida nos dias atuais (FAVERO e LENZI, 2012; WALLACE E HOBBS, 2006). A Tabela 1 traz a composição do ar-seco e sem poluentes.

Tabela 1 – Composição do ar (seco e sem poluentes)

Espécie Química	Concentração (%v/v)
a. Componentes principais	
Nitrogênio (N ₂)	78,084%
Oxigênio (O ₂)	20,946%
b. Componentes secundários	
Argônio (Ar)	0,934%
Gás Carbônico (CO)	0,035% (variável)
c. Demais gases nobres	
Neônio (Ne)	18,18 ppm
Hélio (He)	5,24 ppm
Xenônio (Xe)	0,09 ppm

Fonte: FAVERO e LENZI, 2012.

Apesar dos elementos da Tabela 1, formarem 100% da composição atmosférica é sabido que existem elementos traços encontrados na composição do ar, porém alguns destes variam de acordo com a camada da atmosfera (FAVERO e LENZI, 2012).

Além dos constituintes da atmosfera, o perfil vertical da mesma é também de suma importância devido aos processos radioativos. A Figura 3.1, demonstra este perfil vertical, onde nota-se que na troposfera (região mais próxima da superfície) há uma linearidade da temperatura com a altura, isso ocorre devido ao aquecimento radioativo da superfície que é transferido às camadas inferiores da atmosfera (THOMAS E STAMNES, 1999; WALLACE E HOBBS, 2006).

Figura 3.1 – Perfil vertical de temperatura da atmosfera

Fonte: WALLACE e HOBBS, 2006.

3.2 Espalhamento e Absorção

Pode-se dizer que existem dois processos importantes quando se fala em radiação e como esta interagem com os constituintes da atmosfera: espalhamento e absorção.

Na Figura 3.2 é demonstrado um esquema da interação da radiação com a atmosfera.

Figura 3.2 – Interação radiação-atmosfera

Fonte: SEINFELD e PANDIS, 2006

O espalhamento se refere a energia que quando propagada em uma direção é espalhada ou desviada para outros ângulos (direções), ou seja, ela é espalhada pela interação de alguns constituintes atmosféricos e depende principalmente: das características físicas destes, que pode ser o tamanho da partícula, sua composição química ou até mesmo a forma em que os átomos estão arranjados nas moléculas (RIQUELME,2015).

O espalhamento é geralmente acompanhado por absorção, a qual é responsável pela remoção da energia radiativa incidente, transformando-a em outras formas de energia, sendo que a absorção prevalece em elementos como carvão, fumaça negra, e em contrapartida se torna ausente em nuvens (na região espectral do visível). Já o espalhamento na atmosfera ocorre devido à presença de

moléculas, partículas de aerossol e nuvens que contêm gotas e cristais de gelo (LIOU, 2002; WALLACE e HOBBS, 2006; RIQUELME, 2015;).

O espalhamento e a absorção fazem parte de um processo denominado extinção, pois ambos removem energia de um feixe de radiação quando este atravessa um meio, causando a atenuação do mesmo, a qual é chamada de extinção (LIOU, 2002).

O espalhamento pode ser elástico ou inelástico. O caso elástico pode ser subdividido em Mie e Rayleigh, enquanto o espalhamento inelástico pode ser classificado como Raman. Somente os dois primeiros serão brevemente discutidos a seguir, pois são os mais relevantes para este trabalho.

3.2.1 Espalhamento Elástico

O espalhamento elástico está ligado ao processo em que fótons são absorvidos por átomos ou partículas, sendo remetidos com o mesmo comprimento de onda. Portanto não há perda de energia e o átomo retorna ao seu estado original de excitação.

Na atmosfera existem vários tamanhos de partículas que produzem espalhamento elástico. Como exemplo pode-se citar: as moléculas de gás e granizos, os quais possuem tamanho na ordem de 10^{-8} cm e 1 cm, respectivamente. Geralmente quando se refere a moléculas, o espalhamento é caracterizado como espalhamento Rayleigh, enquanto que para partículas é denominado espalhamento Mie (RIQUELME, 2015).

3.2.1.1 Espalhamento Mie

O espalhamento Mie é usado para se referir a interação de partículas grandes (aerossóis de moda grossa, gotas de nuvens, etc), com a radiação eletromagnética. Tal espalhamento ocorre quando os diâmetros das partículas atmosféricas são semelhantes aos comprimentos de onda da luz dispersa. Acontece principalmente nas porções mais baixas da atmosfera, onde partículas maiores são mais abundantes (MENEZES E ALMEIDA, 2012).

Como apresentado por RIQUELME, 2015, este espalhamento produz um padrão parecido com a de uma antena, Figura 3.3, uma parte mais aguda e

mais intensa do que o espalhamento Rayleigh. É possível observar tal comportamento na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Espalhamento Mie

Fonte: <https://chuckleplant.github.io/2017/05/28/light-shafts.html>

3.2.1.2 Espalhamento Rayleigh

O espalhamento Rayleigh, se refere ao espalhamento de partículas bem menores que o comprimento de onda incidente (partículas geralmente com raio menor que $0,1\lambda$) (RIQUELME, 2015; OLIVEIRA, 2016). Pode – se dizer que o espalhamento Rayleigh também tem uma forte dependência espectral, sendo assim quanto menor for o comprimento de onda, maior será a quantidade de energia removida do feixe de luz (LIOU, 2002; LOPES, 2011).

3.2.3 Coeficiente de Extinção

O espalhamento e absorção da luz por partículas e moléculas pode ocasionar a extinção como já descrito anteriormente.

Sendo assim a luz na atmosfera é atenuada devido à absorção e dispersão por moléculas e partículas. A atenuação da intensidade de entrada $P(z)$ pode ser descrita por:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha P(z) \quad (1)$$

Onde α é o coeficiente de extinção ou atenuação.

Geralmente, o coeficiente de extinção é escrito em termos de coeficientes que representam os diferentes fenômenos que causam a extinção do feixe, (WEITKAMP, 2004; RIQUELME, 2015)

$$\alpha(R, \lambda) = \alpha_{mol.sca}(R, \lambda) + \alpha_{mol.abs}(R, \lambda) + \alpha_{aer.sca}(R, \lambda) + \alpha_{aer.abs}(R, \lambda) \quad (2)$$

Onde os índices *sca* e *abs* representam o espalhamento e absorção respectivamente. O espalhamento em todas as direções contribui para a extinção da luz. A seção transversal de espalhamento (integral) σ_{sca} junto com a seção transversal de absorção σ_{abs} , ambos em m^2 compõem a seção transversal de extinção,

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{sca}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda) \quad (3)$$

Consequentemente, o coeficiente de extinção tem como unidade m^{-1} . Como indicado na equação acima, ambos *sca* e *abs* dependem do comprimento de onda da luz incidente, e esta dependência pode ser definida: pelo tamanho, índice de refração e pela forma das partículas espalhadoras (COSTA, 2015; LOPES, 2011).

3.1.1 3.2.4 Profundidade Óptica do Aerossol – AOD

A Profundidade óptica do Aerossol ou AOD (*Aerosol Optical Depth*) é usada para quantificar quanto da luz solar é impedida de atingir o solo por partículas de aerossol. A AOD é um número adimensional que está relacionado com a quantidade de aerossol na coluna vertical da atmosfera sobre o local de observação (STENFIELD e PANDIS, 2006).

Segundo *NASA Earth Observations (NEO)*⁵, quando encontrado um valor de AOD de 0,05 por exemplo pode-se dizer que a região estudada possui uma atmosfera “limpa”. No entanto, um valor próximo ou igual a 1 corresponderia a uma condição de ar bem mais poluído (SEINFELD e PANDIS, 1998). Essa definição pode ser melhor entendida na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Mapa Global AOD agosto de 2016

Fonte: https://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MODAL2_M_AER_OD

Para se definir a AOD de um Aerossol é necessário primeiro ter um conhecimento da Lei de Beer-Lambert. Essa lei descreve basicamente o desempenho de um feixe de luz (monocromático) que atravessa a atmosfera, onde devido a atenuação a intensidade da luz diminui ao se propagar. Tal atenuação ocorre devido às interações de espalhamento e absorção da radiação e da matéria (partícula ou molécula) (RIQUELME 2015; OLIVEIRA, 2016). Pode-se então definir a Lei de Beer-Lambeert da seguinte maneira:

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau m} \quad (4)$$

Onde:

⁵ https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD

I é a irradiância no detector;

I_0 é a irradiância extraterrestre;

τ é a profundidade óptica de aerossóis;

m é a massa óptica (A qual é a razão entre a profundidade óptica na vertical e a profundidade óptica em outra direção), (TOLEDANO, 2005).

O cálculo da profundidade óptica é realizado com uma medida direta ao Sol, a qual é chamada de medida de extinção (m). Tal medida pode ser exposta em função do ângulo zenital solar (θ):

$$m = \sec\theta \quad (5)$$

Seguindo ainda com a Lei de Beer-Lambert, é possível então calcular a Profundidade Óptica Total (τ), a qual está descrita abaixo:

$$\tau = -\frac{1}{m} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (6)$$

Por fim para calcular a profundidade óptica de aerossóis (τ_A), é necessário que se retire o que tange ao Espalhamento Rayleigh, como é demonstrado na equação 7.

$$\tau_A = \tau - \tau_{SR} \quad (7)$$

Onde τ_{SR} é a contribuição do Espalhamento Rayleigh na profundidade óptica total.

3.2.5 Expoente de Ångström (AE)

O expoente de Ångström é empregado quando se faz necessário descrever a dependência da espessura óptica do aerossol ou do coeficiente de extinção do aerossol com o comprimento de onda (SEINFELD e PANDIS, 1998; LOPES, 2011).

$$\tau_\alpha = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (8)$$

Onde,

β é se refere ao coeficiente de turbidez que condiz com a profundidade óptica de 1 μm , (CORTÉZ e APARICIO, 2014);

λ é o comprimento de onda em μm ;

α é o coeficiente de Ångström dos aerossóis, medido a partir dos valores de coeficiente de extinção.

Assim como a AOD, o expoente de Ångström é calculado por uma aproximação, portanto é necessário uma maior precisão, então o α é calculado em dois comprimentos de onda distintos: $\alpha(\lambda_1/\lambda_2)$, onde λ_1 é um comprimento de onda menor que λ_2 (LOPES, 2011; OLIVEIRA, 2016) o expoente de Ångström então é dado pela seguinte fórmula:

$$\alpha = - \frac{\frac{\tau_{\lambda_1}}{\log \tau_{\lambda_2}}}{\frac{\lambda_1}{\log \lambda_2}} \quad (9)$$

O expoente de Ångström é inversamente relacionado ao tamanho médio das partículas, pois há uma relação entre o comprimento de onda da radiação incidente e o tamanho das partículas, ou seja, no aerossol quanto menor a partícula, maior o expoente de Ångström (ÅNGSTRÖM, 1929). Portanto, ele é um recurso útil para avaliar o tamanho das partículas dos aerossóis ou nuvens, bem como a dependência das propriedades ópticas com o comprimento de onda das propriedades ópticas do aerossol/nuvem (SCHUSTER et.al, 2006).

Conforme SEINFELD E PANDIS, 1998, o expoente de Ångström pode ter valores entre 0 e 4, onde os mais altos se referem a partículas pequenas, pois estas possuem um espalhamento altamente dependente do comprimento de onda e, os valores mais baixos se referem a partículas de tamanho grande. Geralmente admite-se para os aerossóis o coeficiente de Ångström entre 0 e 2,5.

3.3 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é a técnica de identificar, observar e medir propriedades de objetos sem interagir diretamente com eles (NOVO et al., 1998).

Um dos primeiros tipos de sensoriamento remoto utilizado fora o RADAR, o qual trabalha a partir de ondas de radiofrequência. Inicialmente o RADAR era utilizado para detectar navios e aeronaves, com base nesse sistema fora criado o LIDAR, que foi citado pela primeira vez como técnica de sensoriamento remoto em 1953 (UEHARA, 2009).

Existem diversos usos para o sensoriamento remoto entre eles está o mapeamento, levantamento ou monitoramento, sendo também aplicado em diversas áreas como: agricultura, meio ambiente, geologia, recursos hídricos, estudo de solos, florestas entre outros (FIGUEIREDO, 2005).

O sensoriamento remoto engloba comprimentos de onda do ultravioleta, infravermelho e região de micro-ondas, podendo ser classificado em dois tipos:

Passivo: Em sensores remotos passivos a radiação eletromagnética (REM) é a natural, proveniente principalmente da luz solar.

Ativo: Já em sensores remotos ativos a REM é proveniente de uma fonte artificial (FIGUEIREDO, 2005).

A imagem a seguir (Figura 3.5) traz a representação dos dois tipos de sensoriamento remoto (Passivo e Ativo).

Figura 3.5 – Sensoriamento remoto Passivo e Ativo

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2017.

Existem diversas vantagens que o sensoriamento remoto pode apresentar se comparada a outras técnicas similares, uma delas, é a possibilidade de monitorar a atmosfera sem haver a necessidade de ter interferência com os constituintes em estudo, eliminando assim qualquer possibilidade de modificação da amostra durante a medição (SOUZA, 2004).

3.3.1 Monitoramento Atmosférico – Satélites

Além do sensoriamento remoto realizado *in situ*, existe também a possibilidade de ter instrumentos a bordo de aviões e de satélites, aumentando assim a funcionalidade desta técnica e demonstrando o quão versátil ela pode ser.

Uma das vantagens de se ter um sistema em um satélite é que aumenta assim o alcance da região estudada, pois a área de superfície terrestre monitorada por cada satélite pode ser da ordem de metros até centenas de quilômetros. Sendo assim, estes instrumentos que ficam a bordo de satélites são mais abrangentes do que os que são utilizados em campanhas de solo (LOPES, 2011).

O caminho percorrido por satélites é denominado órbita e existem dois tipos de satélites, os quais são classificados de acordo com sua órbita: satélites geoestacionários e de órbitas polares (LOPES, 2011).

Uma combinação de satélites que orbitam ao redor da Terra formando assim o que a NASA denomina *A-Train (Afternoon Constellation)*, uma “constelação de satélites”, estes satélites orbitam próximos uns dos outros de maneira coordenada e planejada para que haja uma melhor cooperação entre as missões obtendo assim mais informações sobre o ambiente da Terra. Há também dois satélites que fazem parte do C-Train e, ficam em órbita abaixo do A-train⁶.

Os satélites do A-Train têm cruzamentos do equador em direção ao Norte no início da tarde, por volta de 13h30min. E uma travessia equatorial noturna ao sul aproximadamente às 1h30min⁶.

Atualmente⁶ as missões da NASA que fazem parte do A-Train são: Aqua, Aura, OCO-2 (*Orbiting Carbon Observatory*), GCOM-W1 (*Global Change Observation Mission-Water*), e do C-Train são: CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations*) e o CloudSat como pode ser observado na Figura 3.7, a seguir.

⁶ <https://atrain.nasa.gov/>

Figura 3.6 – Constelação de Satélites NASA

Fonte: <https://atrain.nasa.gov/intro.php>

Para este trabalho, dentre os satélites que fazem parte do A-train serão utilizados dados do Satélite Aqua. Também serão utilizados dados do satélite Terra, o qual não faz parte da Constelação de satélites, porém é considerado um dos satélites mais confiáveis dentre os que transmitem dados sobre o ambiente terrestre.

3.3.1.1 Satélite Terra

O satélite Terra foi lançado em 1999 e foi o primeiro satélite que trouxe informações sobre a atmosfera terrestre. Ele tem o tamanho aproximadamente de um ônibus escolar, estando a 705 quilômetros acima da superfície da Terra. Sua inclinação é 98,5 graus e, seu período orbital dura em torno de 99 minutos. A

passagem equatorial do mesmo ocorre as 10h30 min, horário local. Na Figura 3.7 podemos observar uma representação gráfica do satélite Terra⁷.

Figura 3.7 – Satélite Terra (Representação gráfica)

Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Terra_\(sat%C3%A9lite\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Terra_(sat%C3%A9lite))

O Terra foi o primeiro satélite a analisar informações do sistema terrestre, coletando dados que transmitem informações sobre componentes e/ou processos atmosféricos relevantes.

O Terra possui 5 instrumentos operacionais no momento:

- *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*
- *Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES)*
- *Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR)*
- *Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT)*
- *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*

Estes cinco instrumentos (sensores), observam a atmosfera, a superfície terrestre, os oceanos, a neve e o gelo além do balanceamento de energia. Um ponto a se levar em consideração é que como todos estes instrumentos estão no

⁷ <https://terra.nasa.gov/>

mesmo satélite, é possível realizar uma comparação de diferentes aspectos das características da Terra por meio de observações simultâneas. Dos cinco sensores presentes no satélite Terra, o que será relevante para essa pesquisa será o MODIS, que traz dados recuperados de AOD e AE.

3.3.1.2 Satélite Aqua

O satélite Aqua foi o primeiro satélite lançado do grupo de satélites denominados A-Train. O lançamento do mesmo ocorreu em 2002, assim como o Terra, ele fica a 705 km acima da superfície terrestre, com uma inclinação de 98,2°. Seu período orbital é de 98,8 minutos, com passagem equatorial é as 13h30min, do horário local. Na Figura 3.8 está demonstrado uma representação gráfica do satélite Aqua⁸.

Figura 3.8 – Representação Gráfica do satélite Aqua

Fonte: <https://aqua.nasa.gov/content/about-aqua>

O Aqua coleta dados, através de seis sensores:

- *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*
- *Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-A)*

⁸ <https://aqua.nasa.gov/content/about-aqua>

- *Humidity Sounder for Brazil (HSB)*
- *Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E)*
- *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*
- *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)*

Estes sensores trazem informações principalmente do ciclo da água na Terra, o que inclui: evaporação dos oceanos, vapor d'água na atmosfera, nuvens, precipitação, umidade do solo, gelo marítimo, gelo terrestre e cobertura de neve na terra e no gelo⁸.

Na Figura 3.9 pode-se observar o posicionamento destes instrumentos a bordo do satélite Aqua.

Figura 3.9 – Esquema dos instrumentos a bordo do satélite Aqua

Fonte: <https://aqua.nasa.gov/content/instruments>

Novamente o sensor que foi utilizado para esta pesquisa foi o MODIS, o qual terá sua descrição no item metodologia deste trabalho.

3.4 LIDAR

LIDAR é uma técnica de sensoriamento remoto ativo, pois utiliza como fonte de radiação eletromagnética um laser. Embora tenha características

semelhantes ao radar, a principal diferença está no modo em que o LIDAR trabalha. Sua faixa de radiação vai do infravermelho até a faixa do visível, enquanto o radar está limitado a faixa de ondas hertzianas (COSTA, 2010).

A partir da década de 60, com a integração do laser a sistemas de monitoramento remoto (sistema LIDAR), houve uma transformação, que elevou a qualidade das técnicas de sensoriamento remoto da atmosfera e, isso se fez principalmente em virtude da alta potência e colimação do feixe de luz, permitindo seu uso em diversos tipos de estudos, como por exemplo: a avaliação da presença de partículas e gases na atmosfera e emissões espontâneas do solo (TROY, 1998). Os sistemas LIDAR voltados para aplicação de monitoramento de poluentes na atmosfera, conforme UEHARA, 2009, podem fornecer, com uma fonte de laser de comprimento de onda de largura de banda estreita, informações da presença e distribuição de partículas de uns poucos nanômetros a cerca de 100 µm de diâmetro e, se o LIDAR for operado com dois sinais diferentes de comprimento de onda, pode-se ter informações da concentração específica do conteúdo de gases na atmosfera, atingindo-se um nível de sensibilidade de até 0,1 ppb, no caso das concentrações moleculares.

O sistema LIDAR realiza o envio de um pulso de luz para atmosfera, o qual interage com determinados componentes atmosféricos em seu trajeto (como por exemplo: moléculas e partículas), os quais agem como espalhadores, e somente uma parcela dessa radiação é retroespalhada para o sistema LIDAR. Essa radiação retroespalhada é recebida por um telescópio e focalizada em um sistema de detecção que processa a medida do sinal (LOPES, 2011).

3.4.1 Equação Lidar

Segundo WEITKAMP, 2005, o sinal detectado por um Lidar pode ser escrito da seguinte forma:

$$P(R) = K G(R) \beta(R) T(R) \quad (10)$$

Sendo P , é a potência do sinal detectado a uma distância R num tempo t , e esta é determinada por 4 fatores:

K , resume o desempenho do sistema LIDAR

$G(R)$, descreve o intervalo dependente das medições geométricas

$\beta(R)$ é o coeficiente de retroespalhamento a uma distância R

$T(R)$, é o termo de transmissão

O Fator K pode ser escrito com maior detalhe segundo a equação a seguir,

$$K = P_0 \frac{C\tau}{2} A\eta \quad (11)$$

Sendo,

P_0 é a potência do sinal transmitido;

τ é a duração do pulso emitido pelo laser;

C é a velocidade da luz;

A é a área do telescópio (receptor) primário, responsável pela coleta da luz retroespalhada;

η é a eficiência geral do sistema, que inclui a eficiência óptica de todos os elementos transmitidos e recebidos pela luz (WEITKAMP, 2005; COSTA 2015).

O fator geométrico é definido pela seguinte equação:

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2} \quad (12)$$

Nela estão inclusos: o campo de visão do telescópio (receptor), o feixe de laser e função *overlap* $O(R)$, antes exposto como R^{-2} (WEITKAMP, 2005).

O coeficiente de espalhamento $\beta(R, \lambda)$ é o primeiro parâmetro atmosférico que determina a força do sinal do Lidar. Este descreve o quanto de luz é espalhada no sentido inverso, ou seja, em direção ao receptor do Lidar (WEITKAMP, 2005).

Na atmosfera a luz do laser é espalhada no ar por moléculas e material particulado, i.e., $\beta(R, \lambda)$ pode ser escrita como:

$$\beta(R, \lambda) = \beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda) \quad (13)$$

O índice *mol* diz sobre o espalhamento molecular, o qual ocorre principalmente por moléculas de oxigênio e nitrogênio e depende sobretudo da densidade do ar. O índice *aer* é designado para partículas de aerossol e se refere ao espalhamento de partículas. Tal índice é altamente variável na atmosfera em todo espaço e em escalas temporais (WEITKAMP, 2005).

Partículas representam uma grande variedade de espalhadores: partículas muito pequenas ou líquidas, sólidas provenientes de poluição do ar, como por exemplo sulfatos, fuligem e componentes orgânicos, poeira mineral grossa, partículas de sal marinho, pólen e outros materiais biogênicos, e também partículas grandes, como partículas de formação de nuvens, gotas de chuvas, cristais de gelo, granizo e neve (WEITKAMP, 2005).

Como parte final da equação LIDAR, têm-se que considerar a fração de luz que se perde no caminho do Lidar com o retroespalhamento. O termo de transmissão $T(R)$ pode alcançar valores entre 0 e 1 pode ser dado por

$$T(R, \lambda) = \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right] \quad (14)$$

Este termo resulta da lei de *Lambert-Beer-Bouguer* para o Lidar, a integral considera o trajeto da distância R do caminho do Lidar. O fator 2 representa o caminho de transmissão bidirecional. A soma de todas as perdas de transmissão é chamada de extinção. É definido de maneira similar ao coeficiente de retroespalhamento como o produto de número de concentração e seção transversal de extinção $\sigma_{j,ext}$ para cada tipo de espalhador j (WEITKAMP, 2005).

$$\alpha(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \sigma_{j,ext}(\lambda) \quad (15)$$

A Extinção pode ocorrer por causa do espalhamento e da absorção da luz por moléculas e partículas como já fora descrito na seção 3.2.3. O coeficiente de extinção portanto pode ser escrito pela soma de quatro componentes, os quais já foram expostos anteriormente na equação 2.

Reunindo então os termos anteriores, é possível sintetizar a equação Lidar de uma maneira mais geral:

$$P(R, \lambda) = P_0 \frac{C\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right] \quad (16)$$

Esta equação pode ser usada com uma ou outra variação, sendo que o sinal detectado sempre consistirá em uma contribuição do *background* (P_{bg}) ou radiação de fundo, além do sinal do LIDAR descrito acima. A radiação de fundo, assim como ruídos provenientes do detector, de certa maneira interferem no sinal LIDAR. Durante o dia a principal fonte de *background* é a luz decorrente da radiação solar. Em casos noturnos a radiação de fundo pode ser oriunda tanto da iluminação artificial local, quanto da luz das estrelas e da lua (WEITKAMP, 2005; COSTA 2015).

Devido a este fato algumas correções são necessárias no sinal LIDAR, o primeiro é referente a radiação de fundo (P_{bg}):

$$P(R) = P_0(R) - P_{BGR}$$

Onde, (17)

$P_{BGR} \rightarrow$ Radiação de Fundo

$P_0(R) \rightarrow$ Sinal Bruto

$P(R) \rightarrow$ Sinal Corrigido

Após esta primeira correção é essencial então uma segunda retificação com relação a altura, onde é multiplicado o sinal corrigido pelo quadrado da distância entre o ponto de coleta de dados e o receptor R^2 , o que pode ser observado na próxima equação:

$$RCS = (P(R).R^2) \quad (18)$$

Após estas correções, é então obtido o RCS.

3.4.2 Principais componentes de um sistema LIDAR

3.4.2.1 Transmissor

O transmissor tem como objetivo ser a fonte dos pulsos de laser luminosos e apontá-lo para a atmosfera. Este tipo de transmissor é muito interessante para o sistema LIDAR, devido aos lasers pulsados que proporciona, pois suas características ópticas podem fazer o laser chegar a uma potência da ordem de 10^9 W. (COSTA, 2010).

De acordo com COSTA, 2010, em um sistema de detecção LIDAR é benéfico manter o ruído ou *background* baixo, ou seja, ter uma área restrita do céu, pois quanto maior for esta área maior será este ruído particularmente se o LIDAR estiver realizando medidas durante o dia. Para diminuir essa diferença do feixe do laser e deixá-lo mais restrito é usado um expensor de feixe, que é um pequeno telescópio que é posicionado na saída do laser, assim além de expandir o feixe também se consegue manter os raios do laser mais paralelos.

3.4.2.2 Receptor

No receptor é onde o LIDAR recebe e processa a luz retroespalhada para um fotodetector que converte fótons em sinal elétrico. Isto ocorre através do espelho primário do telescópio, que recebe a luz retroespalhada pela atmosfera e aponta para um ponto e em um segundo momento, após ser recebida pelo espelho primário, essa luz retroespalhada passa por um segundo espelho que então irá passar o sinal para o fotodetector. (COSTA, 2010; RODRIGUES, 2014).

O diâmetro do espelho primário é um fator que tem de ser levado em consideração, pois este determina a eficiência de um sistema LIDAR, sendo os mais utilizados para trabalhar em baixas altitudes os que tem 10cm de diâmetro (COSTA, 2010).

3.4.2.3 Detector

O detector juntamente com o registrador de dados do LIDAR tem a função de capturar a luz do sistema receptor para assim conseguir registrar permanentemente a intensidade medida como uma função da altitude. No caso o

detector tem o papel de transformar a luz em sinal eletrônico enquanto o registrador é um equipamento e/ou equipamentos que processam e memorizam esse sinal eletrônico.

Um dos tipos de equipamentos usados como detectores em sistemas LIDAR que trabalham na faixa do visível e do ultravioleta são as fotomultiplicadoras (FMTs). As FMTs têm a característica de transformar um fóton incidente em um pulso de corrente elétrica grande o bastante para ser percebido por um sistema elétrico sensível. Este sistema então recebe a resposta da FMT, a mesma pode então ser registrada eletronicamente de duas maneiras: o primeiro registro como modo *photo counting*, e nele os pulsos são contados de forma individual, já na segunda técnica, o analógico, é estimado e registrado a média da corrente através dos fótons pulsados (COSTA, 2010).

3.4.3 Configuração de sistemas LIDAR

Em relação à configuração de sistemas LIDAR, existem dois tipos monoestático e biestático. Na primeira configuração (monoestático), o receptor e transmissor estão no mesmo lugar e o feixe e o campo visual do telescópio são coaxiais. Existe também para esta configuração a possibilidade do transmissor ser adjacente ao receptor, sendo denominado como biaxial como é ilustrado na Figura 3.10 (RODRIGUES, 2014).

Fonte: LOPES, 2011

A Figura 3.11 mostra um esquema de um sistema LIDAR genérico e os demais componentes que integram o sistema.

Figura 3.11 – Diagrama de um sistema LIDAR coaxial genérico

Fonte:

Adaptado de <http://www.lidar.nies.go.jp/AnalysisMethods/DataAnalysis1.html>

3.5 Poluentes

Poluentes são quaisquer substâncias no ar que em concentração suficientemente alta prejudicam: o homem, outros animais, a vegetação. Os poluentes podem ser de composição natural ou antrópica. Podem estar na forma de partículas sólidas, gotículas, gases ou ser uma combinação destes. Geralmente, eles se dividem em dois grupos principais: aqueles emitidos diretamente de fontes conhecidas ou os que são produzidos no ar pela interação entre dois ou mais poluentes primários, ou por reação com constituintes atmosféricos, com ou sem fotoativação. Os poluentes atmosféricos são frequentemente agrupados em categorias para facilitar a classificação, sendo algumas destas categorias: sólidos, compostos de enxofre, produtos químicos, orgânicos voláteis, material particulado, compostos de nitrogênio, compostos de oxigênio, compostos de halogênio, compostos radioativos e odores (EPA, VOCABULARY CATALOG, 2018).

3.5.1 Material Particulado

Material particulado são minúsculas partículas sólidas ou líquidas – com exceção de água em estado puro – que em um determinado espaço de tempo ficam suspensas no ar e quando vistas em quantidades pequenas e dispersas, a olhos nus não notamos sua presença. Porém quando agrupadas e em quantidades maiores notamos estas partículas em forma de névoa muitas vezes formada por poeira, cinzas e fumaça ou outro material particulado (BAIRD E CANN, 2008).

De acordo com BAIRD E CANN, 2008, um ponto a ser destacado no Material Particulado é com relação à sua quantificação e sua divisão em categorias devido o seu diâmetro. O Material Particulado é mensurado através da unidade de medida de concentração $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sendo dividido geralmente em duas categorias:

- Partículas Inaláveis $\rightarrow$ PM_{10} (Conhecida mundialmente) ou MP_{10} (Como é conhecido no Brasil).

- Partículas Inaláveis Finas $\rightarrow$ $\text{PM}_{2,5}$ (Conhecida mundialmente), $\text{MP}_{2,5}$ (Como é conhecido no Brasil).

Segundo a *UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY* – US EPA⁹, tanto as partículas inaláveis (MP_{10}) quanto as partículas inaláveis finas ($\text{PM}_{2,5}$) estão relacionadas ao seu diâmetro aerodinâmico, que para MP_{10} são partículas com diâmetro geralmente inferior a $10\mu\text{m}$ e para $\text{MP}_{2,5}$ são estimados diâmetros menores que $2,5\mu\text{m}$.

Considera-se que as partículas encontradas na atmosfera são esféricas, porém não se pode presumir que todas as partículas têm como forma uma esfera perfeita e sim formatos irregulares. O tamanho das partículas que tem aspecto irregular é determinado por meio do diâmetro equivalente. As definições de diâmetros equivalentes são diversas, porém os termos mais usuais são as de diâmetro aerodinâmico e de diâmetro de Stokes:

Diâmetro aerodinâmico: é o diâmetro de uma esfera perfeita com densidade unitária ($1 \text{ g}/\text{cm}^3$) a qual possui a mesma velocidade de sedimentação que a partícula atmosférica em estudo.

Diâmetro de Stokes: é definido como o diâmetro de uma esfera que tem as mesmas densidade e velocidade de sedimentação de uma partícula em suspensão no ar (FINLAYSON-PITTS e PITTS JR., 2000).

⁹ <https://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.particle>

As partículas inaláveis e inaláveis finas se enquadram na definição de diâmetro aerodinâmico.

Além da classificação de partículas inaláveis e inaláveis finas há também uma outra subdivisão para as partículas encontradas na atmosfera, como fora descrito em (FAVERO e LENZI, 2012):

- Faixa de Acumulação: Partículas com diâmetro $\sim 0,08 \mu\text{m}$ a $1-2 \mu\text{m}$.
- Núcleos de Aitken: Partículas com diâmetro entre $0,01$ a $0,08 \mu\text{m}$.
- Moda Grossa: Partículas com diâmetro entre 2 a $10 \mu\text{m}$.

Na Figura 3.12, pode-se observar a relação do diâmetro do material particulado com a composição química do mesmo.

Figura 3.12 – Diâmetro aerodinâmico da partícula

Fonte: Adaptado de <http://www.urbanemissions.info/wp-content/uploads/docs/2011-03-ESMAP-PMSA-Handbook.pdf>

3.5.2 Processos de Formação do Material Particulado

A formação de material particulado na atmosfera tem origem de duas maneiras: processos naturais e antrópicos e em ambos os processos o material particulado pode ser resultado tanto de fenômenos físicos e ou reações químicas. (JACOBSON, 2002)

3.5.2.1 Processos de Formação Natural do Material Particulado

Os processos de formação natural incluem diversos eventos como: erupções vulcânicas que podem levar para a atmosfera vapor d'água, fumaça e cinzas vulcânicas. A ressuspensão de solo pode ser proveniente da ação eólica em lugares desérticos e solos desprotegidos. O spray marinho chega à atmosfera principalmente através da quebra das ondas do mar, que consequentemente pode levar partículas de sais para a atmosfera. A queima de biomassa natural, é proveniente em geral da queima de florestas naturais. Por último há a liberação de material biológico, que é conduzido até a atmosfera através da ação do vento, insetos e animais que fazem a distribuição destas partículas muitas vezes longe da fonte. (JACOBSON, 2002; FAVERO e LENZI, 2012).

3.5.2.2 Processos de Formação Antrópica de Material Particulado

Principais processos de formação antrópica incluem principalmente emissões fugitivas de poeira (poeira de pavimentação rodoviária, veículos, agrícolas e construção / demolição), queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa antropogênica e emissões industriais (JACOBSON, 2002).

3.5.3 Efeitos do Material Particulado sobre o Meio Ambiente

Os efeitos sobre o meio ambiente se manifestam geralmente através de ações físicas, químicas e biológicas.

- Efeitos físicos: fisicamente o material particulado atinge o meio ambiente principalmente através da redução e distorção da visibilidade do observador. O mesmo também dá origem a superfícies ativadas e iniciam processos de nucleação podendo então influenciar nas condições climáticas. Outro efeito físico importante de ser citado é a luz do fenômeno de espalhamento e/ou reflexão ao incidir num particulado. (FAVERO e LENZI, 2012)

- Efeitos químicos: O efeito químico do material particulado sobre a vegetação ou sobre o solo depende principalmente da natureza dos particulados e de sua composição química, os mesmos podem causar diferentes situações dentro de um ecossistema. Essas situações podem ocorrer dependendo de alguns fatores, como: sensibilidade do ecossistema ou de suas partes a uma determinada concentração e composição química, (como por exemplo: ter propriedades ácido-

básicas, oxidorreduções, entre outras). Dependem também da concentração e velocidade de deposição, assim como outras características, como por exemplo: topografia, clima, uso do solo etc. (FAVERO e LENZI, 2012).

- Os efeitos do material particulado sobre a biota (ou efeitos biológicos) se manifestam de formas variadas geralmente através das propriedades químicas e concentração dos mesmos. Estas ações sofridas são diretas ou indiretas. A ação direta está relacionada ao material particulado que está em suspensão e se deposita sobre este. Isto ocorre através das chuvas, queda das folhas, ou ressuspensão de partículas. A ação indireta é talvez a mais prejudicial, pois o material particulado é transportado para o solo ou para a água, causando efeitos como: acidificação, saturação de nitrogênio, eutrofização, entre outros. Portanto o efeito indireto se torna tão nocivo, pois tem um grande potencial de degradação de ecossistemas (RESENDE, 2007).

3.5.4 Efeitos do Material Particulado sobre a Saúde Humana

Quando se trata dos efeitos do material particulado em relação à saúde humana, as partículas menores que 10 µm são as de maior interesse, pois os seus efeitos são mais nocivos, uma vez que estas são partículas que têm facilidade em penetrar no sistema respiratório e atingem os pulmões, além de também poder prejudicar a parte cardiovascular. As partículas menores são sempre as mais nocivas, porém as maiores apesar de ter efeitos menos nocivos, podem causar irritações cutâneas, nos olhos, boca, garganta e nariz¹⁰.

Existem pessoas que estão mais suscetíveis a ter uma piora do seu quadro clínico, geralmente idosos e crianças estão mais propensos a esta piora e também pessoas com doenças preexistentes como por exemplo: doenças respiratórias ou do coração, também diabéticos, pois os mesmos correm mais risco de terem doenças cardiovasculares¹⁰.

Quanto à exposição ao material particulado, este mesmo sendo de longo ou curto prazo há risco à saúde. A exposição em longo prazo é considerada quando as pessoas que vivem por vários anos em região com alta concentração de material particulado têm um quadro relacionado com redução das funções pulmonares, bronquite crônica e até morte prematura. Já as exposições de curto prazo, que

¹⁰ <https://www.epa.gov/air-research/research-health-and-environmental-effects-air-quality>

duram no máximo dias, podem intensificar doenças pulmonares, causar ataques de asma, bronquite e aumentar a vulnerabilidade a infecções respiratórias. Exposição em curto prazo para pessoas com doenças cardíacas podem causar arritmia e ataques cardíacos.

Adultos e crianças sem doenças preexistentes, geralmente não apresentam alterações em seu quadro clínico em exposições de curto prazo. No entanto podem ocorrer irritações passageiras e pequenas faltas de ar quando há exposição elevada.

Para se ter um controle da qualidade do ar e poder transmitir a população, algum risco eminente, os órgãos reguladores costumam fixar faixas de concentração de poluentes de acordo com os possíveis danos à saúde. No caso do material particulado existe uma faixa de medida nacional para o MP_{10} numa medição de 24 horas, enquanto que para o Estado de São Paulo existem faixas de medida para MP_{10} e $MP_{2,5}$. A CETESB adota as faixas de qualidade do ar relacionadas na tabela abaixo aos seus possíveis danos à saúde¹¹.

¹¹ <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>

Tabela 2 – Qualidade do ar seus efeitos à saúde humana

Qualidade	Índice	Significado
N1 – Boa	0 - 40	
N2 – Moderada	41 - 80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3 – Ruim	81 - 120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4 – Muito	121 - 200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas de tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5 – Péssima	> 200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB, 2018

3.5.5 Legislações Vigentes no Brasil e no Mundo

Em 2006 a Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou novos valores para a qualidade do ar do material particulado. Estes valores são sugestões a serem adotadas pelos países, não é uma obrigação que os países adotem estes padrões, porém através de pesquisas de diversas instituições mundiais sobre os efeitos nocivos do material particulado à saúde humana, a OMS estabeleceu os valores ideais de MP_{10} e $MP_{2,5}$ para uma concentração média anual e concentração de 24 horas. Ela considera que o valor ideal para que não se afete a saúde humana,

para MP_{10} é de $50 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ e para $MP_{2,5}$ é de $25(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ para a média de 24 horas. No caso da média anual o valor é de $20 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ e de $10(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ para o MP_{10} e para $MP_{2,5}$, respectivamente (OMS,2016).

Além da OMS existem outros órgãos para que haja um controle efetivo destes poluentes e conseqüentemente uma melhora efetiva da qualidade do ar. Entre os órgãos mais importantes de controle da poluição atmosférica está a EPA (*Environmental Protection Agency*), desenvolvida nos anos 70, órgão ambiental americano que criou referências para o controle de poluição do ar, escolhendo os poluentes mais abundantes na atmosfera e que são maléficos a saúde humana, os quais são: material particulado inalável (diâmetro $<10\mu\text{m}$), Dióxido de Enxofre (SO_2), Monóxido de Carbono (CO), Ozônio (O_3) e Dióxido de Nitrogênio (NO_2) (CALIJURI et. al, 2013).

Assim como no Brasil existe o CONAMA, o qual será citado mais a frente, nos Estados Unidos os padrões da qualidade do ar são definidos pelo *Clean Air Act*. Igualmente a legislação brasileira, o *Clean Air Act* adota padrões primários e secundários. Esses padrões passam por revisões constantes da *US EPA* (a cada cinco anos). Os padrões norte-americanos para MP_{10} é são de $50 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Média anual) e $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média 24 horas) e $15 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média anual) e $65 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média 24 horas), para $MP_{2,5}$. Apesar do *Clean Air Act* estabelecer os padrões nacionais de qualidade do ar, o mesmo delega aos estados a responsabilidade de garantir que os padrões sejam atendidos. Agindo desta forma cada estado pode se adequar a estes padrões da maneira que lhe for melhor, pois alguns necessitam de padrões mais severos que outros. Porém estes não podem ser menores que os instituídos nacionalmente.

No Reino Unido o órgão responsável é o que mais se aproxima das diretrizes da OMS. Ele estabelece para o MP_{10} um padrão de $50 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ para a média de 24 horas e $40 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ nas médias aritméticas anuais. Porém, no Reino Unido não há padrões para o $MP_{2,5}$ e não são estabelecidos padrões primários e nem secundários, há somente um padrão para os poluentes (REZENDE,2007).

No Brasil, o órgão maior a ser seguido é o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), o qual estabelece parâmetros no âmbito ambiental. Portanto os padrões utilizados hoje no estado de São Paulo são seguidos por uma portaria instituída por tal órgão (DERISIO, 2012).

Segundo DERISIO, 2012, através da Portaria Normativa nº 348, de 14/3/1990, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA – ampliou os números de parâmetros regulamentados na portaria GM nº231, de 27/4/1976, sendo assim submetidos ao CONAMA e posteriormente transformadas na Resolução 003 de 28 de junho de 1990.

Nesta resolução foram então definidos dois padrões de qualidade do ar: padrões primários e padrões secundários.

Os padrões primários consistem em parâmetros estabelecidos pelo CONAMA que visam definir limites que não ultrapassem as concentrações máximas de poluentes que podem afetar a saúde da população. Enquanto que os padrões secundários são parâmetros estabelecidos que ficam abaixo do limite mínimo de concentrações de poluentes que pode vir a causar danos à saúde da população, meio ambiente, flora e fauna entre outros efeitos adversos (DERISIO, 2012).

Assim como o Reino Unido o Brasil não possui padrão para o $MP_{2,5}$, mas possui padrões para o MP_{10} , que são $150(\mu g/m^3)$ para a média de 24 horas e $50(\mu g/m^3)$ para a média anual, o que está um pouco longe do que a OMS considera aceitável para o bem estar da saúde humana.

3.5.6 Legislação no Estado de São Paulo

No início da década de 1970 na região metropolitana do Estado de São Paulo, foi criada a Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e Controle de Poluição das Águas – CETESB. Segundo informações da própria CETESB, as avaliações de concentrações de poluentes nesta região se iniciaram com 14 estações que monitoravam SO_2 e fumaça preta. Somente nos anos 80 a CETESB integraria em sua rede de monitoramento redes automáticas e também a monitoria de outros tipos de poluentes no padrão EPA, tais como: instalação de novas estações para a avaliação de SO_2 , material particulado inalável (MP_{10}), ozônio (O_3), óxidos de nitrogênio – (NO , NO_2 e NO_x), monóxido de carbono – (CO) e hidrocarbonetos não-metânicos – (NMHC)¹².

O monitoramento atmosférico vem sendo realizado há muitos anos pelo órgão estadual CETESB no Estado de São Paulo. Segundo determinação do

¹² <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>

CONAMA é dever dos Estados realizá-lo, portanto era necessário que um órgão estadual ficasse a cargo do controle da poluição atmosférica. O estado de São Paulo teve níveis alarmantes de poluentes lançados na atmosfera, logo o órgão vem monitorando a qualidade do ar desde os anos 70, inicialmente na região metropolitana de São Paulo e ABC, posteriormente Litoral de São Paulo e Interior¹².

As legislações envolvidas no estado de São Paulo, segundo o decreto n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976 proíbe qualquer tipo de poluição da água, do ar e do solo e nomeia a CETESB como órgão fiscalizador para tal.

Ao longo dos anos e conforme o quadro da poluição no estado de São Paulo mudou, era necessário acompanhar as mudanças feitas ao redor do mundo com relação à diminuição da poluição nas grandes metrópoles. Acompanhando então as diretrizes da Organização Mundial da Saúde – OMS em 2008 o Estado de São Paulo começou um processo de revisão dos seus padrões de qualidade do ar¹¹.

De acordo com o site do órgão este processo de revisão resultou no Decreto Estadual nº 59113/2013, o qual define uma série de artigos para garantir a melhoria gradativa da qualidade do ar no estado. Ainda de acordo com o site fora estabelecido como critério de padrões de qualidade do ar:

1. Metas Intermediárias – (MI) estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar no Estado de São Paulo, baseada na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável;
2. Padrões Finais (PF) – Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica¹².

Diferentemente do contexto nacional, o Estado de São Paulo integrou o MP_{2,5} entre os poluentes monitorados e tenta gradualmente diminuir os níveis de poluição. Na Tabela 3, estão relacionados os poluentes monitorados pela CETESB e também quais são as metas intermediárias e os padrões finais a serem atingidos.

Tabela 3 – Padrões qualidade do ar segundo Decreto Estadual nº 59113/2013

Padrões Estaduais de Qualidade do Ar (Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013)					
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 (MP₁₀)	24 horas MAA ₁ ¹	120 40	100 35	75 30	50 20
Partículas inaláveis finas (MP_{2,5})	24 horas MAA ₁	60 20	50 17	37 15	25 10
Dióxido de enxofre (SO₂)	24 horas MAA ₁	60 40	40 30	30 20	20 –
Dióxido de nitrogênio (NO₂)	1 hora MAA ₁	260 60	240 50	220 45	200 40
Ozônio (O₃)	8 horas	140	130	120	100
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	–	–	–	9 ppm
Fumaça* (FMC)	24 horas MAA ₁	120 40	100 35	75 30	50 20
Partículas totais em suspensão^{2*} (PTS)	24 horas MGA ₂	– –	– –	– –	240 80
Chumbo** (Pb)	MAA ₁	–	–	–	0,5

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

¹ MMA – Média Aritmética Anual

² MGA - Média geométrica anual.

* Fumaça e Partículas Totais em Suspensão – parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB.

** Chumbo – a ser monitorado apenas em áreas específicas, a critério da CETESB.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

Cubatão faz parte da área metropolitana da Baixada Santista, com um território de 148 km² e está localizada entre as coordenadas geográficas: Latitude 23°48'53" e 23°50' a 23° 55' Sul e na longitude 46° 30' Oeste de Greenwich (PINTON, L.G. e CUNHA, C.M.L., 2015). A cidade encontra-se a 57 km da Capital de São Paulo e faz divisa municipal com as cidades de Santos, São Vicente, São Bernardo do Campo e Santo André.

Na Figura 4.1, pode-se observar os mapas do estado de São Paulo, destacando-se a região metropolitana da baixada santista e nesta a localização da cidade de Cubatão.

Figura 4.1 – Mapa do Estado de São Paulo, região metropolitana da Baixada Santista e a cidade de Cubatão.

Fonte: Adaptado de <http://web.fflch.usp.br/centrodametropole/222>; VALARINI, S.; NARDOCCI, A.C et. al.

De acordo com informações da Prefeitura de Cubatão¹³, a região é formada por províncias geomórficas (área serrana) e por planícies (morros isolados e planície). A altura máxima é alcançada na Serra do Mar, com 700 metros, sendo a sua altura mínima na planície aproximadamente 3 metros.

O clima predominante em Cubatão é o tropical com suas variações quente e úmido, sendo que a umidade relativa do ar é superior a 80%¹³.

Foram escolhidas duas áreas de estudo, Figura 4.2, as quais aqui serão denominadas de Ecopátio – Cubatão que está localizada entre as coordenadas geográficas: Latitude 23° 50'57".55"S e Longitude 46° 23'20.41"O e Vale do Mogi com as seguintes coordenadas geográficas Latitude 23° 49'53".55"S e Longitude 46° 22'8.97"O com.

Figura 4.2 – Áreas de estudo e estações CETESB

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (18 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'58.11"S, 46°23'29.30"O, 23°49'53.30"S, 46°22'8.95"O Altitude do ponto de visão 13.19 km. Globo Digital 2019. <http://www.earth.google.com> [17 de janeiro de 2017].\

Os locais foram escolhidos devido sua proximidade com as redes de monitoramento de poluentes da CETESB, além de em seu entorno haver indústrias

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

rodovia e alta circulação de veículos pesados. O local da amostragem I foi em um estacionamento de caminhões e a região de amostragem II além de ter características similares ao de amostragem I, vale salientar que próximo ao ponto de coleta de dados há uma planta de fertilizantes. As figuras 4.3 e 4.4 trazem uma imagem mais ampliada dos locais de amostragem I e II com a indicação dos pontos importantes da região escolhida.

Figura 4.3 – Amostragem I, Ecopátio - Cubatão

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (18 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°50'58.11"S, 46°23'29.30"O, Altitude do ponto de visão 13.19 km. Globo Digital 2019. <http://www.earth.google.com> [07 de novembro de 2018].

Figura 4.4 – Amostragem II, Vale do Mogi

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (9 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'53.30"S, 46°22'8.95"O, Altitude do ponto de visão 13.19 km. Globo Digital 2019. <http://www.earth.google.com> [07 de novembro de 2018].

4.2 CETESB

Os dados obtidos pela CETESB foram retirados do Sistema de Informações da Qualidade do Ar - QUALAR. Este sistema foi desenvolvido pela CETESB para o armazenamento de dados que são gerados por suas estações bem como relatórios que são lançados periodicamente entre outras informações pertinentes em relação à qualidade do ar. Foram então selecionados os dados que correspondiam as campanhas realizadas pelo LIDAR nos dias 17/08/2016 e 25/08/2016. Além destas datas foram adquiridas informações sobre as três estações da CETESB (Estação Centro, Vale do Mogi e Vila Parisi), que são relevantes para contextualização deste trabalho. Para gerar os gráficos com os dados do QUALAR foi utilizado a linguagem de programação *Python*.

4.3 LIDAR Elástico

Para a aquisição de dados nas amostragens realizadas nos dias 17/08/2016 e 25/08/2016, foi utilizado um LIDAR modelo comercial desenvolvido pela *Raymetrics lidar Systems S.A* (Figura 4.5). Em relação à configuração de sistemas LIDAR, o equipamento é um lidar elástico, seu sistema de transmissão funciona com um laser de Nd:YAG da *Quantel S.A.*, modelo CFR 450 que trabalha com três comprimentos de onda, 355, 532 e 1064nm, sua energia de pulso é de 100 mJ (em 355 nm), 200 mJ (em 532 nm) e 400 mJ (em 1064 nm), a frequência de repetição do laser é de 20Hz e a largura do pulso de 7+2. O equipamento tem uma resolução espacial de 3,75 m, *overlap* de 140 metros.

Seu receptor é um telescópio cassegraniano de 150mm de diâmetro e razão focal de 4,5 e com um campo de visão de 2mrad. O sistema de detecção é um registrador transiente, um Licel (modelo TR20-80) 10 – 250 MHz (COSTA, 2015).

Foram utilizados duas a linguagens de programação para plotar os dados do LIDAR, *Mathematica* e *Python*, os gráficos foram desenvolvidos então a partir de rotinas desenvolvidas pela Dra. Renata Facundes da Costa e da mestra Marcia Marques.

Figura 4.5 – LIDAR

Fonte: Próprio autor, 2018.

4.3.1 RCS

Range Corrected Signal (RCS) é o sinal retroespalhado corrigido do sistema LIDAR. Primeiramente o sinal bruto é recebido por um programa do *LabView*, através de um registrador transiente chamado LICEL, após passar por este programa do *LabView*, o dado é tratado em um programa desenvolvido no *Mathematica* que faz a subtração da radiação de fundo e a multiplicação pelo quadrado da distância, o sinal então é transformado em RCS. A Figura 4.6 traz um diagrama de como o sinal bruto é transformado em um sinal retroespalhado corrigido (RCS).

Figura 4.6 – Diagrama Sinal Retroespalhado Corrigido

Fonte: Próprio autor, 2018.

4.3.2 LIDAR Doppler

O LIDAR Doppler (LIDAR de vento) que foi utilizado neste trabalho é um modelo da Leosphere, Windcube V2, figura 4.7. Ele trabalha na faixa do infravermelho e foi utilizado nas amostragens para medir o perfil vertical das velocidades do vento e direção do vento em 12 níveis de 40 a 290 m com uma resolução vertical de 20 a 30 m, registrando uma média de 10 minutos com uma resolução temporal de aproximadamente 1 Hz.

Figura 4.7 – Lidar Doppler, Windcube V2

Fonte: MARQUES, 2017.

Para a amostragem foram utilizados os dados em até 100 metros com o intuito de identificar a direções do vento predominante durante as medidas.

4.4 Plataforma GIOVANNI

GIOVANNI (*Goddard Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure*) é uma plataforma web que possui um sistema não sincronizado de gerenciamento de fluxo de trabalho para dados de ciências da Terra. Essa plataforma fornece uma interface clara e objetiva para a visualização, análise e intercomparação de dados de satélites. Ela também fornece aos usuários recursos para download de imagens e de dados em formato padrão (BERRICK et al, 2009). Os dados utilizados foram do equipamento *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS, sensor que fica a bordo dos satélites AQUA e TERRA, sendo que ambos foram usados para as análises de AOD e Expoente de Ångström. A principal diferença entre eles são que o satélite TERRA percorre pela manhã (10h30min.) sobre a linha do equador, enquanto que o AQUA orbita pela tarde (13h30min.) (BUTT, et.al, 2017). Após serem recuperados da plataforma GIOVANNI dos satélites AQUA e TERRA, os dados foram usados para gerar os gráficos deste trabalho, utilizando como ferramenta a linguagem de programação *Python*.

4.4.1 MODIS

O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua. O MODIS tanto do Terra quanto do Aqua visualizam a superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, captando dados em suas 36 bandas espectrais. A sensibilidade radiométrica dele é de 12 bits, comprimento de onda de 400 nm a 1.440 nm. Ele possui um padrão de varredura de ± 55 graus na órbita EOS de 705 km e alcança uma faixa de 2.330 km¹⁴.

A resolução espacial do MODIS é de 250m para as bandas 1 e 2, 500 m da banda 3 à 7 e 1 km da banda 8 à 36, enquanto sua resolução temporal é de aproximadamente de 1 e 2 dias. Os dados do MODIS estão disponíveis na forma de imagens e produtos diários. Além disso, um número de parâmetros climáticos são derivados de uma resolução espacial de 5 km e 10 km usando dados MODIS. Sendo assim os dados obtidos do MODIS (incluindo a distribuição de aerossóis) podem ser muito úteis para o estudo do clima nas escalas local, regional e global sobre a terra e oceano (BUTT, et.al, 2017).

O instrumento MODIS foi construído seguindo as especificações da NASA e representa o que há de melhor até o presente momento na área de sensoriamento remoto para satélites. A seguir temos uma representação gráfica do MODIS e com suas especificações técnicas (Figura 4.8), (BUTT, et.al, 2017).

Figura 4.8 – Especificações técnica do sistema MODIS

Fonte: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/images/modisComponents.jpg>

¹⁴ <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

Para este trabalho foram usados dados MODIS nível 3, com resolução espacial de 1°, que contém cerca de 600 conjuntos de dados estatísticos, derivados de aproximadamente 80 parâmetros científicos de quatro produtos MODIS Atmosfera de Nível 2: Aerossol, vapor de água, nuvem e perfil de atmosfera. Destes existem dois arquivos de produtos de dados do MODIS: MOD08_D3, contendo dados coletados da plataforma Terra e MYD08_D3, contendo dados coletados da plataforma Aqua.

4.4.1.1 Deep Blue

Deep Blue é um produto do MODIS proposto por HSU et al., 2004. Ele consiste em um algoritmo que visa recuperar a concentração de aerossóis das superfícies mais brilhantes usando refletância na faixa de comprimento de onda azul. E ao contrário do algoritmo *Dark Target*, o *Deep Blue* tem incertezas aceitáveis sobre o deserto e o semiárido, além de oferecer dados mais consistentes sobre superfícies refletoras, como desertos e regiões com neve, por exemplo (BUTT, et.al, 2017).

HSU, et al., 2004, demonstrou em um diagrama de fluxo, apresentado na Figura 4.9, uma visão geral do algoritmo de recuperação *Deep Blue*. Antes do processamento de recuperação de aerossol, primeiro são exibidas cenas para a presença de nuvens. A refletância da superfície para um determinado pixel é então determinada para os 412, 490 e 670 nm, canais de um banco de dados com base em sua geolocalização. As radiâncias de 412, 490 e 670 nm são então comparadas às radiâncias de uma tabela de consulta, a qual consiste os ângulos solar, satélite e azimute, a refletância da superfície, espessura óptica de aerossol e albedo de dispersão única.

Figura 4.9 – Fluxograma para recuperação de propriedades ópticas de aerossóis sobre superfícies brilhantes

Fonte: Adaptado de HSU et al., 2004

Para este estudo foi utilizado dados de AOD e Expoente de Ångström do MODIS Deep Blue, ambos de Nível 3 (resolução espacial de 110 km) e no comprimento de onda 550 nm para AOD e 412 e 470 nm para o e Expoente de Ångström.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dados CETESB

Na Figura 5.1 são apresentadas as médias aritméticas anuais para as três estações da CETESB. Nota-se que a estação da Vila Parisi (VP) é a que tem os maiores índices de concentração, portanto é possível afirmar que a região está fora do que foi determinado no Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013 para os padrões de qualidade do ar, em que para MP_{10} é recomendada que a média aritmética anual não ultrapasse $40\mu\text{g}/\text{m}^3$. A região do Vale do Mogi (VM) também ficou fora dos padrões de qualidade na maioria dos anos em que foram recuperados os dados para o poluente MP_{10} . Pode-se dizer que esta região tem os valores elevados provavelmente por estar em um local com várias indústrias, pois como pode ser observado na Figura 5.1, a estação do centro ficou dentro dos parâmetros estipulados por lei. A partir do ano de 2015 nota-se uma queda substancial em todas as estações de monitoramento da CETESB em Cubatão, pode ser atribuído talvez à crise econômica que abalava o país, o que fez com que algumas indústrias diminuíssem ou até encerrassem suas atividades.¹⁵

¹⁵ <https://globalfert.com.br/producao/parque-industrial-de-cubatao-sofre-esvaziamento-de-empresas-de-fertilizante>

Figura 5.1 – Gráfico Média Aritmética Anual de MP10

Fonte: Próprio autor, 2018.

Analisando somente o ano de 2016 (Figura 5.2), pode-se observar que novamente as estações de Vila Parisi e Vale do Mogi ultrapassam ainda e muito os padrões de qualidade instaurados pela CETESB. Mesmo observando uma queda a partir de 2015, para estas regiões ainda são preocupantes os níveis de MP₁₀ alcançados.

Figura 5.2 – Gráfico Concentração de MP10 - 2016

Fonte: Próprio autor, 2018.

5.2 Amostragem I – Vila Parisi – 17/08/2016

Tendo em vista as observações do gráfico anterior, foram então coletadas informações referentes a concentração de MP_{10} para os dias em que foram realizadas as amostragens com o equipamento LIDAR.

A primeira amostragem (I) foi realizada dia 17/08/2016 na região de Vila Parisi, era um dia típico de inverno, a amostragem I teve a duração de aproximadamente 3 horas (entre 11h40min. e 14h46min.). As figuras 5.3 e 5.4 são imagens tiradas *in situ* do dia 17/08/2016. Foram captados dados de três setores diferentes, em três comprimentos de onda, 355nm, 532nm e 1064nm.

Figura 5.3 – Panorama geral da vista do LIDAR

Fonte: Acervo LEAL.

Figura 5.4 – Amostragem I – 17/08/2016

Fonte: Acervo LEAL.

A Figura 5.5 apresenta os dados obtidos no QUALAR referente ao dia da amostragem I, os quais demonstram um crescimento da concentração de MP_{10} no horário das medidas que ocorreram entre 11h40 min. da manhã e 14h46 min. da tarde. Observou-se que a estação da Vila Parisi ficou acima do que se é esperado para um padrão de qualidade do ar para 24 horas, que é de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dentro do período de aquisição de dados e que durante o horário da amostragem o índice de qualidade do ar estava em N4, o que significa uma qualidade do ar muito ruim, como é possível observar na tabela 4.

Tabela 4 – Índice de qualidade do ar durante a amostragem I

Data/ Hora	MP10 (partículas inaláveis) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	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/ Qualidade do dia	121	N4 – Muito Ruim

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

Figura 5.5 – Média diária de concentração de MP10 – 17/08/2016

Fonte: Próprio autor, 2018.

A figura abaixo 5.6, demonstra como funciona a captura dos dados do LIDAR, do ponto de vista do equipamento até a possível área de estudo. Esta representação ajudará a compreender melhor como é a representatividade dos gráficos relacionados a seguir, sendo que o eixo X ($x=r*\cos(\theta)$) indica a distância alcançada com o sinal do LIDAR e no eixo Y ($y=r*\sin(\theta)$) é a altura pelo mesmo.

Figura 5.6 – “Ponto de vista” LIDAR região Ecopátio

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> [07 de novembro de 2018].

Como já descrito em materiais e métodos, foram realizadas duas amostragens com o LIDAR MSPIII, o qual se encontra alocado no Instituto de Pesquisas e Energéticas e Nucleares (IPEN). Como o equipamento é um modelo móvel, foi possível transportá-lo até as regiões de interesse para a aquisição de dados. Os dados estão divididos por região e também por dia de medida.

As Figuras relacionadas abaixo (5.7a, 5.7b e 5.7c) são dados do Sinal Retroespalhado Corrigido – RCS, e através dele é possível identificar a presença de moléculas e partículas. O sinal correspondente ao comprimento de onda 355 nm (canal 355) é sensível à presença de moléculas, já os sinais relativos aos comprimentos de onda 532 e 1064 nm são mais sensíveis a presença de partículas.

Figura 5.7a, 5.7b e 5.7c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 1

Figura 5.7a – Canal 355 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.7b – Canal 532 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.7c – Canal 1064 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.8a, 5.8b e 5.8c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 2

Figura 5.8a – Canal 355 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.8b – Canal 532 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.8c – Canal 1064 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.9a, 5.9b e 5.9c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 3

Figura 5.9a – Canal 355 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.9b – Canal 532 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.9c – Canal 1064 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Dentre os três setores foi observado que a aquisição de dados do setor 3, tem uma maior evidência de concentração de partículas, portanto os dados demonstrados a seguir serão somente desta aquisição.

Com os dados das campanhas foi possível obter gráficos que possuem informações do coeficiente de extinção e do expoente de Ångström, podendo-se inferir o tamanho das partículas que predominavam no dia da campanha.

Os gráficos a seguir (Figuras 5.10a, 5.10b e 5.10c) trazem informações do setor 3, da campanha do dia 17 de agosto de 2016, referente ao coeficiente de extinção (absorção e espalhamento) da região em questão.

Figura 5.10a, 5.10b e 5.10c – Coeficiente de extinção para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Setor 3

Figura 5.10a – Canal 355 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.10b – Canal 532 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.10c – Canal 1064 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Como já fora dito na revisão bibliográfica, o expoente de Ångström tem uma relação inversa com o tamanho da partícula, ou seja, quanto maior o expoente de Ångström menor será o tamanho da partícula, e quanto maior o tamanho da partícula menor será o seu expoente de Ångström (COSTA et al., 2018).

A Figura 5.11 traz o expoente de Ångström do setor 3, sendo que AE foi adquirido através da razão de dois comprimentos de onda diferentes, neste primeiro gráfico está representado a relação dos canais 355/1064 nm.

Quanto ao tamanho das partículas, foi possível observar que há um predomínio de partículas maiores, porém há alguns pontos de partículas pequenas também.

Figura 5.11 – Expoente de Ångström (355/1064 nm) – Setor 3

Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 5.12 traz a relação dos canais 532/1064nm, neste gráfico há uma variação do tamanho das partículas. Percebe-se que há uma maior probabilidade de se ter partículas de tamanhos pequenos quando comparamos com a Figura 5.11.

Figura 5.12 – Expoente de Ångström (532/1064 nm) – Setor 3

Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 5.13 traz o último gráfico do setor 3 que se refere ao expoente de Ångström, relação entre 355/532 neste gráfico é possível observar que quando a relação é entre dois canais de comprimento de onda próximos são detectados poucas partículas com tamanhos menores.

Figura 5.13 – Expoente de Ångström (355/532 nm) – Setor 3

Fonte: Próprio autor, 2018.

Além dos gráficos da amostragem do dia 17 de agosto de 2016 foi realizado um georreferenciamento do gráfico do comprimento de onda 1064 nm do terceiro setor, com o intuito de verificar as possíveis fontes de emissão da pluma detectada pelo sistema LIDAR elástico. A figura também traz a rosa dos ventos da amostragem obtida pelo sistema LIDAR Doppler.

Como é possível observar na figura 5.14, os ventos predominantes eram do norte, pode-se inferir então que a geografia da região e mais a direção do vento, que o ponto de amostragem da Vila Parisi sofre influência do Vale do Mogi, região que tem, por exemplo, plantas de fertilizantes, além de atividades industriais.

Figura 5.14 - Gráfico LIDAR georreferenciado e Rosa dos ventos – Amostragem I

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 novembro de 2018].

5.3 Amostragem II - Vale do Mogi – 25/08/2016

Diferentemente da região da Vila Parisi, os dados coletados no Vale do Mogi foram somente de um setor, portanto teve menor duração, entre 12h07min. e 12h44min. da tarde. A Figura 5.15 traz um panorama do ponto de amostragem no Vale do Mogi, assim como na amostragem anterior a foto demonstra que era um dia típico de inverno, sem muita incidência de nuvens.

Figura 5.15 – Panorama do ponto de amostragem

Duração da campanha:
aproximadamente 1 hora
Inclinação: 13°
Janela de medida: 40°

Fonte: Acervo LEAL.

Também para esta amostragem foi verificado o índice de qualidade do ar para o período da mesma, notou-se que o índice para este dia estava em N1, o que determina um índice de qualidade ar bom para o período, como pode ser observado na tabela 5.

Tabela 5 – Índice de qualidade do ar durante a amostragem II

Data/ Hora	MP10 (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/ Qualidade do dia	24	N1 – Boa

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

Para a segunda amostragem, 25/08/2016, a concentração de MP_{10} se apresentou abaixo do padrão de qualidade do ar (PQar) em duas das estações (Centro e Vale do Mogi), como é possível observar na Figura 5.16. Não foram disponibilizados dados de concentração para a estação de Vila Parisi dentro do horário de aquisição de dados do LIDAR, porém ao longo do restante do dia observou-se que a concentração de MP_{10} ficou em sua maioria acima do padrão de Qualidade do Ar.

Figura 5.16 – Média diária de concentração de MP_{10} – 25/08/2016

Fonte: Próprio autor, 2018.

Através da representatividade do ponto de vista do equipamento LIDAR, figura 5.17 é possível ver que possivelmente as informações coletadas são oriundas das plantas de fertilizantes da região.

Figura 5.17 – “Ponto de vista” LIDAR região Vale do Mogi

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (17 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'53.30"S, 46°22'8.95"O, Altitude do ponto de visão 13.19 km. Globo Digital 2019. <http://www.earth.google.com> [07 de novembro de 2018].

Diferentemente da região da Vila Parisi, os dados coletados no Vale do Mogi foram somente de um setor, portanto a amostragem foi de menor duração. Assim como na região anterior a figura que será apresentada a seguir são dados do Sinal Retroespalhado Corrigido – RCS (Figuras 5.18a, 5.18b e 5.18c).

Figura 5.18a, 5.18b e 5.18c – Sinal Retroespalhado Corrigido para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm) – Região Vale do Mogi

Figura 5.17a – Canal 355 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.17b – Canal 532 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.17c – Canal 1064 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Assim como para a região de Vila Parisi, na campanha do dia 25 de agosto de 2016, também foram obtidos resultados referentes ao coeficiente de extinção (absorção e espalhamento), os quais estão representados nos gráficos a seguir (Figuras 5.19a, 5.19b e 5.19c).

Figura 5.19 - Coeficiente de extinção para os três comprimentos de onda (355, 532 e 1064 nm)

Figura 5.19a – Canal 355 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.19b – Canal 532 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.19c – Canal 1064 nm

Fonte: Próprio autor, 2018.

Os dados obtidos com a campanha do dia 25 de agosto de 2016 também contribuíram para gerar dados de expoente de Ångström, podendo assim ter uma melhor compreensão da relação entre o AE e o tamanho das partículas da região. A Figura 5.20 traz a razão entre os canais 355/1064nm, que demonstra um ambiente com algumas possíveis concentrações de partículas menores.

Figura 5.20 – Expoente de Ångström (355/1064 nm)

Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 5.21 traz o expoente de Ångström na razão de 532/1064 nm e é possível observar uma homogeneidade das partículas, portanto é cabível dizer que existem na região partículas maiores e menores também.

Figura 5.21 – Expoente de Ångström (532/1064 nm)

Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 5.22, é expresso o expoente de Ångström na razão 355/532 nm, nota-se que ainda há uma certa homogeneidade nas partículas, porém elas estão mais dispersas que na figura anterior.

Figura 5.22 – Expoente de Ångström (355/532 nm)

Fonte: Próprio autor, 2018.

Na figura 5.23 estão relacionados o dado georreferenciado do canal 1064 da amostragem II e a rosa dos ventos que foi gerada pelas informações do LIDAR de vento. Diferentemente da região de Vila Parisi, o Vale do Mogi no dia da amostragem estava com ventos predominantes de sudoeste, e a partir deste dado é possível supor que a pluma de aerossóis detectada pelo LIDAR elástico era oriunda principalmente das plantas de fertilizantes que ficam próximas ao ponto de coleta de dados.

Figura 5.23 – Gráfico georreferenciado LIDAR e Rosa dos ventos – Amostragem II

Fonte: Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (17 de julho de 2018). Cubatão, Brasil. 23°49'53.30"S, 46°22'8.95"O, Altitude do ponto de visão 13.19 km. Globo Digital

5.4 Dados GIOVANNI

5.4.1 AOD

A figura 5.24 traz uma série temporal da AOD da cidade de Cubatão referente aos dados extraídos da plataforma GIOVANNI dos anos de 2010 até 2017. Estes são dados dos dois satélites Terra e Aqua e o que se pode notar é que na média geral o satélite Aqua fica ligeiramente acima do satélite Terra e ambos não ultrapassam o valor de 0.1 de AOD.

Figura 5.24 – Série temporal, de 2010 até 2017 da AOD para a cidade de Cubatão (Satélite Terra e Aqua)

Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 5.25 traz uma série temporal do satélite Terra e Aqua com valores de AOD do ano de 2016 juntamente com as médias mês a mês para a cidade de Cubatão, demonstrando que no período que se foi observado, a AOD teve pico máximo por volta de 0.4 para o satélite Terra e para o mês de agosto a média ficou em torno de 0.05, enquanto que para o satélite Aqua, a AOD ficou um

pouco acima que o valor recuperado para o satélites Terra, cerca de 0.08. Já os picos de AOD no geral apresentaram valores maiores do que os constatados pelo satélite Terra, sendo o maior em 0.5.

É possível notar que nos dois casos, tanto para os satélites Aqua e para o satélite Terra o mês de agosto está entre os meses que tem os menores valores de AOD, e a partir de setembro há uma crescente em ambos casos até meados de dezembro.

Figura 5.25 – Série temporal, ano de 2016 da AOD para a cidade de Cubatão (Satélite Terra)

Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 5.26 traz os dados do satélite Terra e Aqua para o mês de agosto de 2016, mês em que foram realizadas as campanhas *in situ* com o sistema LIDAR. Os dados mostram que para os dias de campanha (17 e 25 de agosto) os valores de AOD para o satélite Terra ficaram próximos de 0.05 e 0.03

respectivamente. Para o satélite Aqua, apesar de apresentar valores de AOD menores do que o satélite Terra, com pico máximo em torno de 0.3, nos dias de campanha (17 e 25 de agosto) é possível perceber um ligeiro aumento da AOD para estes dias chegando próximo de 0.09 no dia 17 e 0.7 no dia 25.

Tais valores, segundo a literatura, pode indicar uma atmosfera mais limpa, ou seja, pouco ou quase sem nenhum poluente nos dias citados. Apesar desse resultado em outros dias do mês foram obtidos valores de AOD entre 0.3 e 0.4, o que pode apontar presença de aerossóis na região.

Figura 5.26 – AOD recuperado da plataforma GIOVANNI para o mês de agosto de 2016 (Satélite Terra)

Fonte: Próprio autor, 2018.

5.1.1 5.4.2 Expoente de Ångström

Para todos os casos aqui estudados foram utilizados dados de Satélite Aqua e Terra, utilizando o produto *Deep Blue* com comprimentos de onda em 412 e 470 nm.

Assim como para os casos de AOD, a figura 5.27 traz a série temporal para os anos de 2010 a 2017 referente ao expoente de Ångström extraídos da

plataforma GIOVANNI para a cidade de Cubatão. Nestes dados é possível notar que em ambos os satélites o Expoente de Ångström fica acima de 1.4 e para as médias anuais não ultrapassa a casa do 1.5.

Figura 5.27 – Série temporal, de 2010 até 2017 do AE para a cidade de Cubatão (Satélite Terra e Aqua)

Fonte: Próprio autor, 2018.

A imagem a seguir, Figura 5.28 também foram recuperadas da plataforma GIOVANNI dos mesmos satélites Aqua e Terra. Esta figura mostra dados do expoente de Ångström para a região de Cubatão no ano de 2016. Para ambos os casos, o mês de estudo deste trabalho apresentou valor de média mensal igual a 1.5, como pode ser observado em ambas as figuras. Somente o mês de dezembro do satélite Terra apresentou um aumento no valor de Expoente de Ångström, 1.65 aproximadamente. Estes valores podem indicar que a atmosfera da região contém presença de aerossóis, e uma predominância de partículas menores, o que incluiria as partículas inaláveis.

Figura 5.28 – AE recuperado da plataforma GIOVANNI para o mês de agosto de 2016 (Satélite Terra)

Fonte: Próprio autor, 2018.

Igualmente aos dados de AOD, para o AE também foram gerados gráficos referentes ao expoente de Ångström para o mês de Agosto, a fim de verificar melhor os dias de interesse deste trabalho. Para o satélite Terra, os valores adquiridos de expoente de Ångström foram iguais em ambos os dias (17 e 25 de agosto), 1.5 acompanhando assim a média mensal obtida, o que pode ser observado na Figura 5.29. Para o satélite Aqua (Figura 5.29), os valores de expoente de Ångström registrados nos dias 17 e 25 de agosto ficaram em 1.3 e 1.5 respectivamente. Como já mencionado anteriormente pode se dizer que este valor é um indicativo para aerossóis na região, principalmente de partículas menores.

Figura 5.29 – AE recuperado da plataforma GIOVANNI para o mês de agosto de 2016 – Satélite Terra

Fonte: Próprio autor, 2018.

As Figuras 5.30 e 5.31 representam AOD em função do Expoente de Ångström para o ano de 2016 para os dois satélites Aqua e Terra, em ambos os casos a predominância é de uma AOD de valor 0.1, sendo que quando a mesma atinge este valor o Expoente de Ångström geralmente não ultrapassa a margem de 1.5. É possível observar também que à medida que a AOD aumenta obtêm-se alguns valores um pouco maiores de Expoente de Ångström, podendo chegar para o ano em questão em até 1.8.

Figura 5.30 – AOD em função do Expoente de Ångström recuperados da plataforma GIOVANNI para o ano de 2016 – Satélite Terra

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 5.31 – AOD em função do Expoente de Ångström recuperados da plataforma GIOVANNI para o ano de 2016 – Satélite Aqua

Fonte: Próprio autor, 2018.

6 CONCLUSÕES

A partir dos dados captados neste trabalho é possível presumir que as partículas inaláveis estão presentes na região estudada. Com as informações da CETESB recuperadas do site QUALAR foi viável demonstrar principalmente que as partículas inaláveis estão presentes na região e ultrapassam a regulamentação da CETESB para o poluente.

Com os dados de RCS do LIDAR, pôde-se observar que o canal 1064 nm é o mais sensível para detecção de partículas. Ao analisar os dados obtidos nas amostragens dos dias 17 e 25 de agosto de 2016, onde no dia 17 foram realizadas três sessões de aquisição de dados em três regiões diferentes da campanha no Ecopátio-Cubatão, a obtenção das informações do setor 3 fora o que teve melhor representatividade para o estudo, o que pode ter ocorrido devido as plantas industriais próximas a região de medidas. No dia 25 de agosto foi realizada somente uma tomada de dados, porém foram coletados dados significativos.

Também com os dados do LIDAR foram gerados dados de expoente de Ångström, verificando a relação entre os tamanhos das partículas, nos gráficos de expoente de Ångström do setor 3, principalmente na relação entre os canais 355/1064 nm e 532/1064 nm, é notável a presença de partículas menores, sendo mais evidente ainda na relação 355/1064 nm. Para o dia 25 de agosto de 2016, os dados do expoente de Ångström também foram adaptados, sendo que neste dia as três relações de canais captaram uma quantidade significativa de partículas tanto maiores quanto menores, a relação 532/1064 nm mostrou uma homogeneidade de partículas que nas outras relações entre os comprimentos de onda não fora captado tão intensamente.

Também foram recuperados dados de AOD e Expoente de Ångström pela plataforma GIOVANNI. A maioria das medidas de AOD ficaram em torno de 0.1, nos dias que coincidiram com as campanhas de medidas LIDAR. Em outros dias do mês de agosto mostram alguns picos de AOD entre 0.3 e 0.4, para ambos os satélites, porém ainda assim as médias ficam em torno de 0.1, o que deve ocorrer devido a área de alcance dos satélites que abrangem cerca de quilômetros. Já os dados que foram recuperados de expoente de Ångström trazem um indicativo que há uma predominância de partículas menores, pois o seu valor ficou geralmente entre 1.5 para os dias de campanhas com o LIDAR e para os demais dias oscilou entre 1.1 até 1.8 e a média para região fica aproximadamente em 1.5, o que indica uma região com aerossóis de tamanho proporcional às partículas inaláveis.

Todas as técnicas utilizadas neste trabalho ajudaram a compreender as características ópticas das partículas inaláveis da região de Cubatão, pois foram observados dados de AOD e AE via satélite que nos permite ter uma visão mais macro da região, já os dados coletados através das campanhas com o Lidar trouxeram informações mais pontuais, pois o alcance eram de alguns metros. Os dados da CETESB então serviram de base para dados mais superficiais. Nestas três esferas de dados então pode se obter informações sobre as partículas inaláveis de maneira macro até uma escala micro.

Por fim, a partir deste trabalho foi possível observar que Cubatão tem características de uma região com uma poluição bem presente, sendo o MP_{10} (partículas inaláveis), um dos poluentes com mais altos índices. Analisando todas as técnicas utilizadas, a combinação entre elas trouxeram parâmetros que demonstram que o aerossol presente na região tende a ser um aerossol menor, ou seja, partículas inaláveis, sendo que a técnica LIDAR juntamente com os dados de concentração da CETESB ofereceram informações substanciais e por serem mais pontuais apresentaram melhores resultados para a região.

6.1 Sugestão Para Futuros Trabalhos

Como sugestão de sequência para estudo seria interessante abranger mais o campo de pesquisa, utilizando as técnicas deste trabalho para as demais regiões próximas à Cubatão, no caso, cidades da Baixada Santista. Outra sugestão seria também fazer uso de linguagem de programação *Python* que geram mapas a partir de dados do instrumento MODIS, que podem indicar parâmetros de partículas inaláveis finas, por exemplo (APÊNDICE).

7 REFERÊNCIAS

ÅNGSTRÖM, A. ***On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air***, Vol. 11, pp. 156-166, Blackwell Publishing, 1929.

BAIRD, C. and CANN, M. – ***Environmental Chemistry***, W. H. Freeman and Company 2008, 4^a. Ed.

BERRICK, S.W., LEPTOUKH, G., FARLEY, J. D., RUI, H. ***Giovanni: web service workflow-based data visualization and analysis system***, IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, Vol. 47, No. 1, 2009.

BUTT, M. J., ASSIRI, M. E., ALI, M. A. ***Assessment of AOD variability over Saudi Arabia using MODIS Deep Blue products***, 2017, Elsevier.

CALIJURI, M.C e CUNHA, D.G.F. – ***Engenharia Ambiental – Conceitos, Tecnologias e Gestão*** – Elsevier, 2013.

CETESB - ***Dados estações CETESB*** - Disponível em < <https://cetesb.sp.gov.br>> Acesso em 10 de maio de 2017.

CETESB - ***Histórico CETESB*** - Disponível em < <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>> Acesso em 5 de maio de 2017.

CETESB - ***Índice Qualidade do Ar*** - Disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padrees-de-qualidade-do-ar/>> Acesso em 5 de outubro de 2017.

CETESB - ***Sistema QUALAR*** - Disponível em < <https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>>

CORTÉS-HERNÁNDEZ, V.E., APARICIO, J. ***Caracterización de aerosoles por quema de biomasa en el sureste de México***. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. V, núm. 1, janeiro-fevereiro de 2014, p. 145-156.

COSTA, R. F. – ***Estudo das Propriedades Ópticas dos Aerossóis no Estado de São Paulo com a Técnica de LIDAR Raman***; 2010. 90p. – IPEN – (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais); Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN, Universidade de São Paulo; São Paulo, SP, Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em: 15 de setembro de 2017.

COSTA, R. F. ***Sensoriamento Remoto a Laser de Aerossóis em uma Refinaria de Petróleo***. 2015 . 117p. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais); Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN, Universidade de São Paulo; São Paulo, SP, Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em: 10 de junho de 2018.

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 Cubatão, Brazil, using a scanning elastic lidar and a lidar doppler*** - EPJ Web of Conferences, Volume **176**, 2018.

COSTA, R. S. ***Influência dos aerossóis atmosféricos na quantificação do recurso energético solar: experimentos em modelo de transferência radiativa*** -Dissertação de Doutorado, 2012, 247p. - São José dos Campos: INPE, SP.

Polo de Cubatão - ***Crise*** – Disponível em <<https://globalfert.com.br/producao/parque-industrial-de-cubatao-sofre-esvaziamento-de-empresas-de-fertilizante>> Acesso em 10 de janeiro de 2019.

Cubatão – ***Aspectos Geográficos*** – Disponível em <<http://www.cubatao.sp.gov.br/aspectos-geograficos/>> Acesso em 21 de Julho de 2018.

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.

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.

DERISIO, J.C. – ***Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*** – Oficina de textos, 2012, 4ª. Ed.

EICHINGER, W. E. ; KOVALEV, V. A. - ***Elastic lidar: theory, practice and analysis methods*** - New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

EPA - ***Definição de Poluentes*** - Disponível em <<http://www3.epa.gov/pm/>>; <<https://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.particle>> Acesso em 10 de junho de 2018.

EPA - ***Definições de Poluentes*** - Disponível em <[https://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do;jsessionid=Q-394r0Ok00-yGq2yILYh43yi4QxSaFVt9WXrBTTNh4_fffXuO3O!1825335812?details=&vocabName=Terms%20of%20Env%20\(2009\)#form](https://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do;jsessionid=Q-394r0Ok00-yGq2yILYh43yi4QxSaFVt9WXrBTTNh4_fffXuO3O!1825335812?details=&vocabName=Terms%20of%20Env%20(2009)#form)> Acesso em 10 de maio de 2018.

EPA - ***Efeitos Material Particulado na Saúde*** - Disponível em <<https://www.epa.gov/air-research/research-health-and-environmental-effects-air-quality>> Acesso em 23 de agosto de 2018

FAVERO, L. O. B e LENZI, E. – ***Química da Atmosfera – Ciência, vida e sobrevivência*** – 2012.

FIGUEIREDO, Divino - ***Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto*** - Setembro de 2005 – Disponível em <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf> – Acesso em 07/09/2017

FINLAYSON-PITTS, B.J.; PITTS JR., J.N. ***Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere – Theory, Experiments, and Applications***. Academic Press, 2000.

HSU, N. Christina, TSAY, S. Michael, KING D., and HERMAN J. R. ***Aerosol Properties Over Bright-Reflecting Source Regions*** - IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42, No. 3, Março, 2004.

IBGE – ***Dados demográficos - Cubatão*** – Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/cubatao/panorama>> Acesso em 18/11/2017

JACOBSON, M.Z. – ***Atmospheric Pollution – History, Science and Regulation*** – 2002, 1ª.Ed.

LIOU, K. N.- ***An Introduction to Atmospheric Radiation***, 2002, Elsevier Science (USA), 2ª.Ed.

LOPES, F.J. da S. – ***Validação dos dados do satélite CALIPSO utilizando um sistema LIDAR de retroespalhamento elástico e o fotômetro solar da rede AERONET***. 2011. 169 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em 10 de junho de 2018.

MARQUES, M.T.A. ***Obtenção da altura da camada limite planetária através da análise espectral do campo de vento do lidar Doppler***. 2017. 65p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em 16 de setembro de 2018.

MENESES, P. R. e ALMEIDA, T. - ***Introdução Ao Processamento De Imagens De Sensoriamento Remoto*** – Brasília, 2012.

NARDOCCI, A.C et. al. - ***Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão***, São Paulo, Brasil-Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, São Paulo, 2011.
NEO - ***Definições de AOD*** - Disponível em <https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD> Acesso em 18 de maio de 2018.

NASA – ***A-train*** - Disponível em:< <https://atrain.nasa.gov/>> Acesso em maio de 2018

NASA – ***Instrumeto MODIS*** - Disponível em:<<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>> Acesso em maio de 2018

NASA – ***Satélite Aqua*** - Disponível em:< <https://aqua.nasa.gov/content/about-aqua> > Acesso em maio de 2018

NASA – ***Satélite Terra*** - Disponível em:< <https://terra.nasa.gov/>> Acesso em maio de 2018

NOVO, Evelyn M.L de Moraes - ***Sensoriamento Remoto, Aplicações Básicas***. - Edgard Blücher Ltda. 2ªed.1998.

OLIVEIRA, D.C.F. dos S. **Caracterização e classificação das propriedades ópticas de aerossóis na atmosfera de Natal, Brasil** – Dissertação de Graduação – 2016. 28p - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Tecnologia, Natal, RN.

OMS – **Dados de MP_{10} e $MP_{2,5}$** - Disponível em:
<http://www.paho.org/bra.../index.php?option=com_content&view=article&id=5096:niveis-de-poluicao-do-ar-estao-crescendo-em-muitas-das-cidades-mais-pobres-do-mundo&Itemid=839> Acesso em dezembro de 2017.

PINTON, LG., and CUNHA, CML. Cubatão. In: CUNHA, CML., and OLIVEIRA, RC., orgs. **Baixada Santista: uma contribuição à análise geoambiental** [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2015, pp. 137-158. ISBN 978-85-68334-55-3.

RESENDE, Fernando. **Poluição atmosférica por emissão de material particulado: avaliação e controle nos canteiros de obras de edifícios**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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.

RIQUELME, A.S. **Caracterización Óptica De Aerosoles Troposféricos Utilizando La Técnica Lidar**, Dissertação de Doutorado, 2015, Universidad de Concepción Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas; Departamento de Física, Concepción, Chile.

RODRIGUES, Patrícia Ferrini – **Avaliação da Higroscopicidade de Aerossóis Urbanos pela Técnica Raman** – IPEN – São Paulo, 2014.

SCHUSTER, G. L., DUBOVIK, O., HOLBEN, B.N **Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions**, Journal of geophysical research, vol. 111, 2006.

SEINFELD, J. H., PANDIS, S. N. – **Atmospheric Chemistry And Physics From Air Pollution To Climate Change** - A Wiley-Interscience Publication; John Wiley & Sons, Inc., 2. Ed

SOUZA, Renata Fernandes - ***Estudo do Perfil Vertical de Aerossóis na Troposfera Utilizando a Técnica LIDAR*** – IPEN – São Paulo 2004.

SPIRO, Thomas G. ; STIGLIANI, William M. ***Química Ambiental***. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

TROY, C.T. - ***Photonics Spectra; Environment*** - April Issue 1998.

UEHARA, Sandro Toshio – ***Análise de Dados do Sistema LIDAR de Retroespalhamento Correlacionada com Dados Meteorológicos***. – IPEN – São Paulo, 2009.

VALARINI, S. ***Caracterização do material particulado em Cubatão – Dissertação de Mestrado***. 2011. 134 p. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em 10 de junho de 2018.

WALLACE, J. M. e HOBBS, P.V – ***Atmospheric Science, An Introductory Survey*** – Elsevier, 2006, 2. Ed.

APÊNDICE I – MAPAS MODIS EM PYTHON

APÊNDICE II – TRABALHOS PUBLICADOS

MONITORING THE INDUSTRIAL SOURCES OF AEROSOL IN CUBATAO, BRAZIL, USING A SCANNING ELASTIC LIDAR AND A LIDAR DOPPLER

Renata F. da Costa^{1*}, Marcia T. A. Marques², Fernanda de M. Macedo³, Izabel da Silva Andrade², Elaine Cristina Araujo³, Thais Correa³, Maria Helena Gonçalves de Andrade Salani³, Daniel Silveira Lopes³, Maria Lucia Gonçalves Guardani³, Eduardo Landulfo³, Roberto Guardani¹

¹University of São Paulo, Chemical Engineering Department, Brazil, *renata.facundes.costa@usp.br

²IPEN – Energy and Nuclear Power Research Institute, Brazil

³CETESB – São Paulo State Environmental Agency, Brazil

ABSTRACT

Field campaigns with a scanning multiwavelength elastic lidar coupled with a Doppler system to monitor industrial atmospheric aerosol emissions were carried out, with the objective of monitoring aerosol emission sources and plume dispersion. Since the technique provides information on the spatial and temporal distribution of aerosol concentration, the implementation of a systematic monitoring procedure is proposed as a valuable tool in air quality monitoring applied to regions of interest.

1 INTRODUCTION

The area around the Brazilian city of Cubatão is known for the highly concentrated industrial activities, which, combined with the specific geographical situation, results in a series of problems related with air quality [1].

Cubatão is located in a narrow coastal plain surrounded by a steep mountain range to the north, west, and east, and by the sea to the south. In the region, there is a large oil refinery, a steel production site, a cement plant, plus a number of petrochemical and fertilizer plants, and the largest harbor in South America. At ca. 1 km west and northwest a 600-1000 m high mountain shall retains air circulation. Due to the local topography and proximity of the ocean, wind direction and velocity show daily changes that affect air quality, and frequent events of high pollutants concentration in the industrial area are recorded. A significant number of events of high levels of PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, and SO₂ are recorded by the local authority (CETESB), which operates 5 air quality monitoring stations in the region [2].

2 SYSTEM SETUP

For the study presented here two lidar systems were used. A three-wavelength elastic backscatter lidar system and a Doppler lidar.

2.1 Elastic lidar

The three-wavelength elastic backscatter system operates with a Nd:YAG laser (CFR 450, Quantel S.A.) at 355 nm, 532 nm, and 1064 nm, transmitting pulses of 7±2 ns in duration at a fixed repetition rate of 20 Hz and a divergence of less than 0.3 mrad. The receiver used to collect the backscattered laser light is a 150 mm diameter Dall-Kirkham telescope with an effective focal length of 1000 mm.

2.2 Doppler Lidar

The Doppler lidar is a pulsed lidar model Windcube V2 from Leosphere that detects the frequency shift from the backscattered light due to the particles movement, the frequency shift is proportional to the line-of-sight velocity and the wind velocity and the wind direction can be inferred. The lidar was set up to measure vertical profile of wind velocities and wind direction in 12 levels from 40 to 290 m with a vertical resolution of 20 to 30 m, recording 10 minutes averaging with a temporal resolution of approximately 1 Hz. The Doppler lidar was co-located to the Elastic lidar during the measurement campaign.

3 METHODOLOGY

The campaigns for data collection were carried out in Cubatão during August 2016, under dry weather conditions, to monitor the spatial and temporal distribution of aerosols in the region. The lidar systems were installed in the center of

COMMUNITY MODELING AND ANALYSIS SYSTEM

Correlation study between air quality data and the Lidar system in Cubatão, São Paulo

Elaine Cristina Araujo³, Izabel da Silva Andrade², Fernanda de M. Macedo³, Thais Correa³, Maria Helena Gonçalves de Andrade Salani³, Renata F. da Costa¹, Sergiana dos Passos Ramos³, Marcia T. A. Marques², Daniel Silveira Lopes³, Maria Lucia Gonçalves Guardani³, Eduardo Landulfo³, Roberto Guardani¹

¹University of São Paulo, Chemical Engineering Department, Brazil, renata.facundes.costa@usp.br

²IPEN – Energy and Nuclear Power Research Institute, Brazil

elaine.c.araujo@usp.br, izabel.landarde@usp.br, fernanda.m.macedo@usp.br, correa-thais@usp.br, maresalania@usp.br, marcia.marques@usp.br, elandulfo@ipen.br

³CETESB – São Paulo State Environmental Agency, Brazil

dslopes@sp.gov.br, lguardani@sp.gov.br, rguardani@gmail.com,

*FATEC-PG – Faculdade de Tecnologia de Praia Grande

sergiana@fatecpg.com.br

Abstract: We present here the results of two methods: a scanning multiwavelength elastic lidar system and CETESB's QUALAR System belonging Environmental Company of the State of São Paulo located in an industrial area. The objective is a comparison of these two methods to identify fixed sources of aerosol and to monitor plume dispersion. The results of the two aligned techniques indicate that can provide information on the concentration, spatial and temporal distribution of aerosol.

Keywords: LIDAR, Remote Sensing, Pollutants, Aerosol, PM₁₀.

INTRODUCTION

Cubatão is a city located in state of São Paulo, Brazil. The region has some fixed fonts of aerosols, like industrial complex and the forest, and also has a high concentration of mobile sources, because there is some important highways that connect the region to the upland. As Cubatão is situated in a coastal plain, this brings some factors that affect the air quality, such as topography and proximity of the ocean and daily changes. A significant number of events of high levels of pollutants, are recorded by the local authority (CETESB), which operates 2 air quality monitoring stations in the industrial area and one in the urban area.

METHODS

It was used for the present work a three wavelength elastic backscatter system operated with a Nd:YAG laser (CFR 450, Quantel SA) at 355 nm, 532 nm and 1064 nm, transmitting pulses of 7 ± 2 ns of duration at a fixed repetition rate of 20 Hz and a divergence less than 0.3 mrad. The system also has a receiver used to collect backscattered laser light, a 150 mm diameter Dall-Kirkham telescope with an effective focal length of 1000 mm.

For the construction of a comparison line, data were also used from the QUALAR - State System of Information on Air Quality of CETESB, through

which data on pollutants are available throughout the state territory by manual and automatic networks, these are available in different formats. In the case of this work, among all the pollutants monitored by CETESB were selected: NO, NO₂, O₃ and PM₁₀ to make an analogy with the LIDAR system.

The data extracted from the automatic networks of the QUALAR system are time data of the date of the campaign.

FINDINGS AND ARGUMENT

A campaign was conducted for data collection in August 2016 in the city of Cubatão / SP. The collection site was close to a CETESB station - Vila Parisi - (LAT 23° 51' 08.06" - LON 46° 23' 26.40"). It was directed to Vale do Mogi area. The purpose was to monitor the spatial and temporal distribution of the aerosols in the region and to correlate these results with pollutant graphs (NO, NO₂, O₃ and PM₁₀) obtained by CETESB's QUALAR System from a stations located ~ 2km and 4km from where the LIDAR system was installed.

The stations of the CETESB that were used are the stations Centro and Vale do Mogi.

The data demonstrate a considerable amount of particulate matter in the study region. In figure 1A, we have a graphical representation of the backscatter of the particles with wavelength of 355 nm, we noticed a moderate concentration of aerosols. In Fig. 1B, with a wavelength of 532 nm, in it can be considered as a larger grouping of

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.