



RODOLFO ROMANIELLO CARDOSO

**CONTRIBUIÇÃO DAS FONTES INDUSTRIAIS NA
CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO DA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE-MG**

LAVRAS – MG

2019

RODOLFO ROMANIELLO CARDOSO

**CONTRIBUIÇÃO DAS FONTES INDUSTRIAIS NA CONCENTRAÇÃO DE
MATERIAL PARTICULADO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE-MG**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Curso de
Engenharia Ambiental e Sanitária,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Prof. DSc. Marcelo Vieira da Silva Filho

Orientador

LAVRAS – MG

2019

RODOLFO ROMANIELLO CARDOSO

**CONTRIBUIÇÃO DAS FONTES INDUSTRIAIS NA CONCENTRAÇÃO DE
MATERIAL PARTICULADO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE-MG**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Curso de
Engenharia Ambiental e Sanitária,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em 25 de junho de 2019

Prof. DSc. Marcelo Vieira da Silva Filho DRS - UFLA

Prof. DSc. Cristiane Alves Pereira DEG - UFLA

Prof. DSc. Regina Maura de Miranda EACH-USP

Prof. DSc. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira DRS-UFLA

Prof. DSc. Marcelo Vieira da Silva Filho

Orientador

LAVRAS – MG

2019

*Aos meus pais Reginaldo e Handria e aos meus irmãos
Rafael e Raphiza.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus, por me dar o dom da vida e me permitir ter forças conquistar os meus sonhos e vencer todos os obstáculos que encontrei pelo caminho.

Gostaria de agradecer também à Universidade Federal de Lavras por me fornecer os recursos necessários para um excelente aprendizado, um amadurecimento pessoal, cultural e profissional. A CAPES e CNPq pelas bolsas adquiridas.

Agradeço aos meus pais Reginaldo e Handria, que não mediram esforços em me proporcionar uma excelente educação e me amar incondicionalmente apesar de todos meus defeitos. Aos meus irmãos Rafael e Raphiza que mesmo com as brigas, nunca desistiram de me apoiar. A toda família Romaniello e Cardoso por todo suporte recebido, em especial a minha avó Lourdes. Essa vitória também é de vocês.

Ao meu orientador, Marcelo Vieira da Silva filho, pela extrema paciência, dedicação e por sempre acreditar em mim quando eu mesmo não acreditei.

Agradeço a Preserva Jr, por me fazer acreditar ser um agente de mudança do meu país e me consolidar enquanto Engenheiro Ambiental e Sanitarista, além de todas as amizades adquiridas. Ao NESAMB por me abrir a um mundo de ideias e me fazer ter certeza de que escolhi o caminho certo.

Aos meus amigos da JAULA (Renan, Pena, Bruna R, Jessika, Gabi, Ana Cláudia, Laís, Peterson, Fernando, Gui Muirilo, Léo), do Maternal (Gui Neri, Lukao, Dudu e Pelé), da Química (Allan, Jana, Bext, Amanda, Jas, Danilo, Babi, Del, Bruna Vaz, Richard, Ju e Wildao) e ao meus amigos da UFLA 2014/1 e 2014/2 que conviveram comigo durante todos esses anos, obrigado por todo companheirismo, paciência e amizade.

Agradeço a Nexa pela oportunidade de realizar um estágio fantástico e por me permitirem conhecer tanta gente que hoje me servem de inspiração. Em especial o setor de Saúde, Segurança e Meio Ambiente, os estagiários 2018, Izabel, Gabi e Drielle.

E, por fim, agradeço a todo o corpo técnico e docente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, por todos os conhecimentos adquiridos.

RESUMO

A ação antrópica intensifica a poluição do ar com o lançamento contínuo de substâncias nocivas na atmosfera, diminuindo a qualidade do ar e implicando em prejuízos à saúde e efeitos danosos ao ambiente. Sabe-se ainda que, devido à instalação de indústrias de grande porte sem programas de controle, algumas regiões brasileiras encontraram desafios em meados das décadas de 1980 e 1990. Dentre os poluentes emitidos, cabe destacar o material particulado (MP₁₀), sendo esse correlacionado aos danos à saúde humana, tanto em estudos clínico-epidemiológicos como experimentais. A atmosfera é corresponsável por episódios agudos de poluição do ar em concurso com as fontes poluidoras, respondendo pelo processo de dispersão de poluentes por meio da turbulência atmosférica. Sendo assim, estudos de dispersão de poluentes atmosféricos são fundamentais para se avaliar os impactos na qualidade do ar de uma determinada região. Para o estudo desses fenômenos na Troposfera é necessária a utilização de ferramentas de monitoramento dos poluentes e de modelos matemáticos de dispersão atmosférica. Diante disso, esse estudo teve por objetivo avaliar a contribuição industrial na concentração de material particulado da Região Metropolitana de Belo Horizonte - MG (RMBH-MG), a partir do modelo matemático AERMOD. O modelo matemático foi utilizado para simular as concentrações de material particulado com diâmetro menor que 10 µm (MP₁₀) na atmosfera urbana da RMBH, no período de 1 a 23 de junho de 2017 nos centros das cidades de Belo Horizonte, Contagem e Betim. Comparou-se os dados simulados com dados monitorados *in situ* pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Os dados de entrada do modelo utilizado foram dados meteorológicos, atributos de superfície do terreno (Albedo, Razão de Bowen e Z₀) e dados da fonte emissora a ser analisada. Os dados meteorológicos utilizados advém das estações Av. do Contorno (Belo Horizonte), Cidade Industrial (Contagem) e Centro Administrativo (Betim). Os atributos de superfície do terreno sucedem de estudos de Victoria (2013). Os dados referentes às fontes fixas advém do inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana de Belo Horizonte de 2003 publicado pela FEAM. O modelo convergiu satisfatoriamente para Belo Horizonte e Betim. Entretanto a estação meteorológica de Contagem não apresentou alguns dados *in situ*, motivo pelo qual o modelo não convergiu para as médias de 24h, sendo necessário utilizar a regressão $y=0,061x-13,442$, ajustada a partir dos resultados de Belo Horizonte e Betim. Contagem obteve as menores alturas de camada de mistura convectiva, o que pode ter dificultado os processos de dispersão atmosférica, e ter apresentado as maiores concentrações máximas de MP₁₀ da região analisada, atingindo valores de 47,85 µg m⁻³, enquanto que Belo Horizonte e Betim alcançaram resultados máximos de 11,30 µg m⁻³ e 23,29 µg m⁻³, respectivamente. Dentre os resultados, verificou-se que a contribuição de MP₁₀ emitido por fontes fixas industriais variaram entre 45 a 47% em Belo Horizonte, 42% para Betim, e 92 a 95% para Contagem em relação às concentrações *in situ*.

Palavras-Chave: Modelagem Atmosférica, AERMOD, Camada Limite Planetária, Dispersão Atmosférica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura Vertical da Atmosfera.....	16
Figura 2- Ciclo diurno da espessura da camada limite planetária.....	17
Quadro 1- Fontes e características dos principais poluentes na atmosfera.....	22
Quadro 2- Legislações brasileiras acerca de poluição atmosférica.....	23
Figura 3- Estrutura do sistema AERMOD.....	35
Figura 4- Representação esquemática da pluma Gaussiana.....	35
Figura 5- Mapa da delimitação dos municípios de Belo Horizonte, Betim e Contagem.....	37
Figura 6- Tipologias das fontes de emissão da RMBH segundo DN 217/2017.....	39
Quadro 3- Parâmetros necessários ao arquivo de superfície (.sfc).....	41
Quadro 4- Parâmetros necessários ao arquivo de perfil (.pfl).....	42
Figura 7- Perfis das alturas (m) da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), CBL e SBL para Belo Horizonte.	51
Figura 8- Perfis das alturas (m) da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), CBL e SBL para Contagem.....	52
Figura 9- Perfis das alturas (m) da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), CBL e SBL para Betim.....	52
Figura 10- Perfil horário (m) com intervalo de confiança da SBL e CBL da cidade de Belo Horizonte.....	53
Figura 11- Perfil horário (m) com intervalo de confiança da SBL e CBL da cidade de Betim.....	54

Figura 12- Perfil horário (m) com intervalo de confiança da SBL e CBL da cidade de Contagem.....	54
Figura 13- Gráfico de Correlação de Pearson e dendograma de similaridade pelo método de Ward e Single Linkage entre as variáveis u*(camada de mistura e estável), CBL, SBL, u, Tmec, Tterm, W*, UR, direção do vento, H, Rn, T e L (camada de mistura e estável) para Belo Horizonte.....	57
Figura 14- Gráfico de Correlação de Pearson e dendograma de similaridade pelo método de Ward e Single Linkage entre as variáveis u*(camada de mistura e estável), CBL, SBL, u, Tmec, Tterm, W*, UR, direção do vento, H, Rn, T e L (camada de mistura e estável) para Betim.....	58
Figura 15- Gráfico de Correlação de Pearson e dendograma de similaridade pelo método de Ward e Single Linkage entre as variáveis u*(camada de mistura e estável), CBL, SBL, u, Tmec, Tterm, W*, UR, direção do vento, H, Rn, T e L (camada de mistura e estável) para Contagem.....	59
Figura 16- Boxplot de Concentrações de MP10 em $\mu\text{g m}^{-3}$	61
Figura 17- Concentrações máximas das distancias de 100, 200, 300, 400, 500 m e in situ em comparação com a resolução CONAMA 491/2018.....	62
Figura 18- Perfil espacial das concentrações para o centro de Belo Horizonte.....	65
Figura 19- Perfil espacial das concentrações para o centro de Betim.....	66
Figura 20- Perfil espacial das concentrações para o centro de Contagem.....	66
Figura 21- Distribuição geográfica das indústrias localizadas na RMBH.....	68

LISTA DE SIGLAS

AERMAP	<i>AERMIC terrain preprocessor</i>
AERMET	<i>AERMIC meteorological preprocessor</i>
AERMOD	American Meteorological Society / Environmental Protection Agency Regulatory Model
CBL	<i>Convective Boundary Layer</i>
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLP	Camada Limite Planetária
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECOSOFT	Empresa de Consultoria e Softwares Ambientais
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
FIAT	<i>Fabbrica Italiana Automobili Torino</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MP	Material Particulado
MP ₁₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 10µm
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
PRONAR	Programa Nacional de Qualidade do Ar
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SBL	<i>Stable Boundary Layer</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Padrões de qualidade do ar segundo a Resolução CONAMA 491/2018.....	26
Tabela 2- Coordenadas geográficas dos receptores para o modelo AERMOD.....	39
Tabela 3- Coordenadas geográficas das estações meteorológicas analisadas.....	43
Tabela 4- Parâmetros de superfície utilizados no input do modelo.....	44
Tabela 5- Concentrações ($\mu\text{g m}^{-3}$) simuladas pelo modelo AERMOD para as distâncias de 100, 200, 300, 400, 500 m.....	63

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Atmosfera e Camada limite planetária.....	15
3.2 Poluição Atmosférica.....	17
3.2.1 Definição	17
3.2.2 Poluentes e seus impactos negativos	19
3.3 Legislação no Brasil.....	23
3.4 Padrões de Qualidade do Ar.....	25
3.5 Material Particulado	27
3.6 Dispersão Atmosférica	29
3.7 Parâmetros de Superfície e Micrometeorológicos	31
3.7.1 Parâmetros de superfície.....	31
3.7.2 Parâmetros micrometeorológicos	31
3.8 Modelos Matemáticos de dispersão atmosférica	33
3.9 Modelo AERMOD	34
4. METODOLOGIA.....	36
4.1 Caracterização da região de interesse	36
4.2 Fontes de emissão e definição dos receptores.....	39
4.3. Cálculo dos parâmetros meteorológicos e de superfície	40
4.4 Diretrizes do modelo AERMOD	49
4.5 Modelagem estatística	50
4.5.1 Linguagem R.....	50

4.5.2 Correlação de Pearson	51
4.5.3 Análise de Cluster	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1 Turbulência Atmosférica e a Camada Limite Planetária da RMBH	52
5.2 Associações Estatísticas dos Parâmetros Micrometeorológicos	57
5.3 Modelagem da Concentração de Material Particulado na RMBH.....	61
5.4 Modelagem Espacial das Concentrações de Material Particulado na RMBH .	65
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

O relatório da Assembleia Mundial da Saúde publicado em maio de 2015 reconheceu a poluição atmosférica como a maior ameaça para a saúde humana atualmente, destacando o material particulado com um dos principais agentes (WHO, 2015). A relevância desse tema tornou-se evidente com o aumento das emissões de poluentes causado pelo crescimento das áreas urbana e industrial. Segundo o relatório da Organização das Nações Unidas (ONU), espera-se que em 2045 a população urbana em nível mundial ultrapasse os seis bilhões de pessoas (WHO, 2015).

Paralelo a isso, na 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), em Paris, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças. O Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável. O compromisso ocorre no sentido de manter o aumento da temperatura média global em bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (WHO, 2015).

No que se refere ao Brasil, no final do ano de 2018, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou duas novas resoluções a respeito da poluição do ar. A Resolução 490 regula a oitava fase (Fase P8) do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), limitando os poluentes e ruídos de veículos pesados que serão vendidos a partir de 2022. Enquanto que Resolução CONAMA 491/2018 definiu novos limites de concentração de poluentes aos padrões de qualidade do ar, esses ainda mais restritivos, possuindo atualizações em quatro etapas, sendo os valores da etapa final iguais aos valores guias definidos pela Organização Mundial da Saúde - OMS em 2005 (MMA, 2018).

Visando também as perspectivas trazidas pela atualização da legislação relacionada com a qualidade do ar, se fazem necessários estudos que associem a poluição atmosférica à saúde da população e às mudanças climáticas.

As atividades industriais levam à produção de diversos poluentes que são liberados na atmosfera, alterando a sua composição e influenciando na qualidade do ar. Além disso, quando concentrações dos gases estão presentes a níveis elevados, produzem efeitos nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente. A magnitude do lançamento das emissões das fontes estacionárias, o transporte e a diluição na atmosfera determinam o estado atual da qualidade do ar (BRAGA et al, 2005).

A utilização de modelos numéricos de dispersão de poluentes atmosféricos prevê possíveis cenários para concentrações, ao nível do solo, de um determinado poluente que está sendo emitido por fontes pontuais contínuas. Esse instrumento viabiliza a verificação de impactos ambientais causados por uma determinada fonte e avalia-se a qualidade do ar local (MARTINS; FORTES; LESSA, 2015).

Os modelos de dispersão Gaussiana são os mais recomendados para fins regulatórios, e dentre os quais destaca-se o AERMOD. Esse modelo utiliza dados meteorológicos de superfície e altitude, provenientes de estações meteorológicas, dados de radiossondagens, possibilitando estimar as emissões, determinar as áreas de maior impacto sobre a qualidade do ar e os efeitos da meteorologia e topografia no processo de deslocamento da pluma de contaminação (LAKES, 2014).

A capital do estado de Minas Gerais é Belo Horizonte cuja população é estimada em 2.501.576 pessoas (IBGE, 2018). A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), é uma região predominantemente urbana e destaca-se pelo elevado número de indústrias de diversas tipologias, em especial as do setor metalúrgico e minerário, representando 66% da produção do estado.

A atividade de monitoramento da qualidade do ar depende de recursos que vão desde a manutenção dos equipamentos aos processos de armazenamento de dados. Minas Gerais possui apenas 29 estações automáticas, sendo dez estações em toda RMBH e 19 estações instaladas em outros seis municípios. Dessa maneira, a modelagem matemática da dispersão de poluentes, se torna uma ferramenta fundamental para avaliação da qualidade do ar frente a escassez de recursos para expandir a rede de monitoramento existente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Simular a dispersão das emissões de material particulado produzidas pelas fontes industriais da Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG por meio do modelo AERMOD, utilizando o período base de junho de 2017.

2.2 Objetivos Específicos

- Adequação do modelo AERMOD, código-fonte aberto no *Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM)* da *Environment Protection Agency (EPA)*, para os dados meteorológicos obtidos no Brasil;
- Estimar os parâmetros meteorológicos e averiguar o comportamento da Camada Limite Planetária e de turbulência atmosférica da região estudada, discutindo sua influência na dispersão atmosférica;
- Avaliar a contribuição das fontes fixas poluidoras nas cidades de Belo Horizonte, Contagem e Betim frente aos dados *in situ* de estações de monitoramento de qualidade do ar.

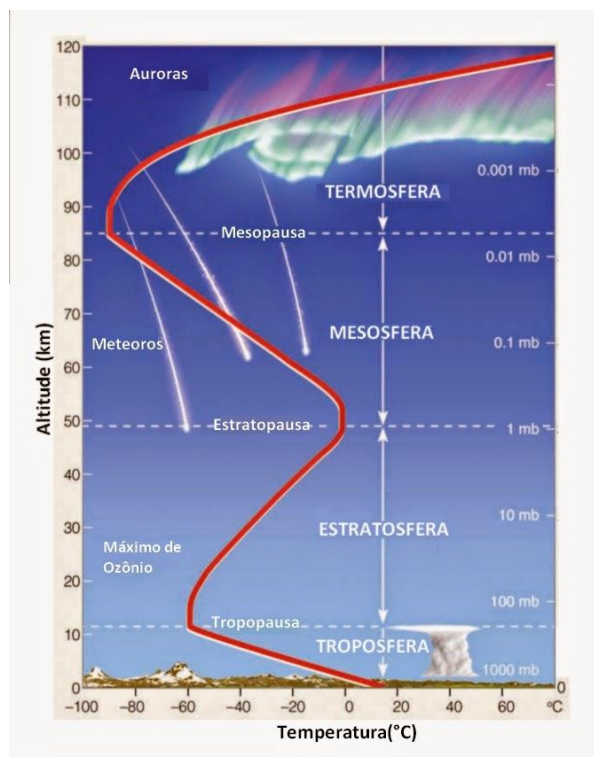
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Atmosfera e Camada Limite Planetária

A atmosfera terrestre é produto de fenômenos físico-químicos e biológicos iniciados a milhões de anos. Compreende uma camada composta de gases, partículas sólidas e líquidas, em suspensão, que envolvem completamente a Terra, (KEMP, 1994).

Os 100 km mais próximos da Terra constituem a baixa atmosfera, também sendo denominada Homosfera. Ela divide-se em Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera (Figura 1). A Troposfera vai desde o solo até 11km de altitude aproximadamente, e apresenta uma queda de temperatura com o aumento da altitude, o qual é característica dessa região (LOECK,2014). É a camada responsável pela ocorrência das condições climáticas da Terra e onde ocorre a maioria dos fenômenos relacionados à poluição do ar. (BRAGA, 2005).

Figura 1- Estrutura Vertical da Atmosfera



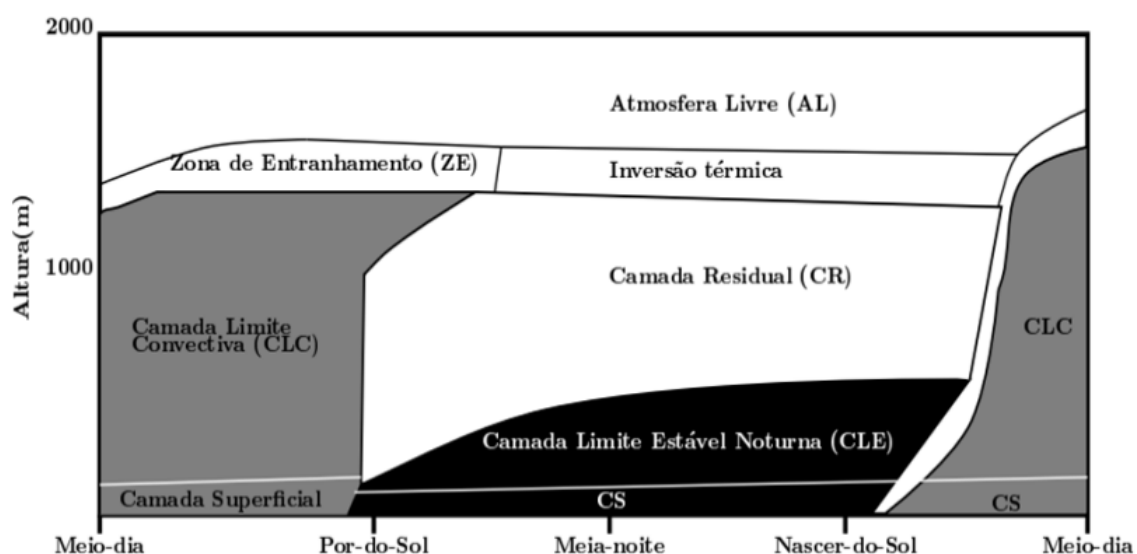
Fonte Adaptado de AHRENS, C.D.: Meteorology Today 9th

Além disso, a Troposfera pode ser decomposta em duas partes: Camada Limite Planetária (CLP) que compõe a região adjacente à superfície terrestre de 500 a 3000m de altitude; e atmosfera livre que contempla o restante da Troposfera (LOECK, 2014).

A CLP é fortemente influenciada pela superfície da Terra, e sua espessura é bastante variável longo do ciclo diário de tempo e no espaço, conforme a Figura 2 (STULL, 1991). Segundo Moraes et al (2010), esse fato é caracterizado pelos movimentos turbulentos gerados por forçantes mecânicos e térmicos. Durante o dia, a superfície da Terra é aquecida pelo Sol, e transfere o calor desta para o interior da atmosfera mais fria. Esta intensa mistura vertical, conhecida como termas, possibilita que a altura da CLP aumente a uma altura superior a 1 km. Durante a noite, existe uma transferência de calor no sentido inverso, retirando energia dos movimentos turbulentos e diminuindo a altura da CLP.

De acordo com Stull (1991), a CLP pode se repartir em três: Camada Limite Convectiva (CLC) ou *Convective Boundary Layer* (CBL), se desenvolve durante o dia sendo considerada uma zona de mistura com muita turbulência; Camada Residual (CR), menos turbulenta que a anterior; e. Camada Limite Estável (CLE) ou *Stable Boundary Layer* (SBL) ou Camada Limite Noturna (CLN) que se desenvolve durante o período noturno e é bem mais estável que as demais (Figura 2).

Figura 2- Ciclo diurno da espessura da camada limite planetária.



Fonte: Adaptado de Stull (1991)

Zannetti (1990) afirma que a turbulência na CLP, é o principal fator na dispersão vertical dos poluentes e é resultado direto dos efeitos térmicos (movimentos convectivos) e mecânicos (cisalhamento do vento horizontal).

3.2 Poluição Atmosférica

3.2.1 Definição

A atmosfera recebe emissões de gases e partículas naturais e antropogênicos que provocam alterações sensíveis na qualidade do ar. As fontes dos poluentes são potencialmente numerosas e a atividade antrópica, por sua vez, acaba por intensificar a

poluição do ar com o lançamento contínuo de grandes quantidades de substâncias nocivas por meio dessas fontes.

Embora os efeitos da poluição tenham sido descritos desde a antiguidade, a poluição começou a ter um grande impacto sobre a população com o advento da Revolução Industrial. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que a poluição do ar causa aproximadamente 20.000 mortes/ano, um valor que é cinco vezes maior que o número estimado de mortes por tabagismo (ARBEX et al, 2012).

A qualidade do ar de uma região é influenciada por um complexo conjunto de fontes emissoras fixas (indústrias, queima de lixo, emissões naturais, entre outras) e móveis (veículos automotores, aviões, trens, navios e embarcações). A intensidade do lançamento desses gases, seu transporte e diluição na atmosfera, determinam o estado atual da qualidade do ar atmosférico (CUNHA, 2002). Segundo Barcellos et al (2005), as fontes fixas ocupam uma área relativamente limitada, o que permite uma avaliação direta na fonte. A poluição a partir de fontes móveis se dispersam mais facilmente pela região, não sendo possível a avaliação na base de fonte por fonte.

O desenvolvimento econômico de um país associado ao aumento da urbanização acarreta no aumento de indústrias e trânsito de pessoas, que leva conseqüentemente no acréscimo do número de fontes móveis e fixas (GUARIEIRO et al, 2011; FERNANDES, 2010).

A poluição do ar nos centros urbanos decorre principalmente da queima de combustíveis fósseis, os quais emitem diariamente toneladas de substâncias sólidas e gasosas (MARTINS; FORTES; LESSA, 2015). É evidente que esse fato afeta a qualidade de vida da população visto que a diminuição da qualidade do ar causa conseqüentemente prejuízos à saúde e efeitos perigosos ao ambiente (GUARIEIRO et al, 2011). Problemas como chuva ácida, destruição da camada de ozônio, efeito estufa, destruição da fauna e flora, são exemplos desses efeitos.

Segundo Guarieiro *et al* (2011), as partículas dos poluentes:

- Agem como núcleo de condensação de nuvens, podendo alterar o clima em escala local e global, afetando inclusive a visibilidade atmosférica;

- Podem absorver ou espalhar a radiação solar, com efeitos que contribuem para as mudanças climáticas e alteração do balanço radioativo;
- Representam superfícies ativas sobre as quais ocorrem reações químicas e fotoquímicas atmosféricas;
- Tem influência direta ou indireta sobre a saúde humana, quando em suspensão no ar.

Dessa forma, a poluição atmosférica caracteriza-se como um fenômeno típico de regiões urbanas e industrializadas, sendo definida como mistura complexa e altamente variável de diferentes substâncias, as quais podem ocorrer na fase gasosa, líquida ou sólida que, em concentrações elevadas, possuem potencial de causar efeitos negativos em seres humanos, animais, vegetação ou materiais (MORAES et al 2010, WHO 2006).

Outra definição de poluição, encontra-se na Lei 6.938/81 (Política Nacional de Meio Ambiente), que descreve:

Degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energias em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

3.2.2 Poluentes e seus impactos negativos

O nível de poluição atmosférica é determinado a partir da quantificação das substâncias poluentes presentes no ar. Segundo a Resolução CONAMA nº 491 de 2018, poluente atmosférico é:

Qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público,

danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade;

A agência de proteção ambiental norte-americana, *Environmental Protection Agency* (EPA), utiliza indicadores de qualidade do ar como parâmetro na quantificação do nível de poluição atmosférica. Os poluentes enquadrados são: óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), oxidantes fotoquímicos expressos como ozônio (O₃) e hidrocarbonetos totais.

Os poluentes podem ser reconhecidos de acordo com seu estado físico (líquido, gasoso ou sólido) e são classificados em primários e secundários. De acordo com estudos de Loureiro (2005), os primários são aqueles lançados diretamente pelas fontes de emissão, como exemplo: o monóxido de carbono, o dióxido de enxofre, NO_x, entre outros. Na baixa atmosfera, esses poluentes podem sofrer transformações e reações fotoquímicas dando origem a poluentes denominados secundários. Os secundários, tais como o ozônio, necessitam de certo tempo e ocorrem à medida que as massas de ar se deslocam. É normal que concentrações elevadas destes poluentes atinjam áreas mais afastadas das fontes de emissão que os poluentes primários.

Tundo e Zecchini (2007) relatam que os poluentes primários, depois de emitidos para a atmosfera, são submetidos a processos de transporte, mistura e transformação química, os quais distribuem as suas concentrações na atmosfera tanto no âmbito espacial quanto temporal. Essa distribuição depende das condições que são emitidos e das condições meteorológicas, podendo alguns poluentes ser transportados a grandes distâncias antes de atingirem o nível do solo.

Ao definir a concentração de um poluente na atmosfera, avalia-se o nível de exposição dos receptores (seres humanos, outros animais, plantas, materiais) e suas interações na atmosfera, do ponto de vista físico (diluição em função das condições meteorológicas) e químico (reações químicas) (CETESB, 2011).

Os impactos locais são verificados nas áreas próximas às fontes de poluição, sendo aqueles perceptíveis pela população causando danos à saúde humana. O aumento

desenfreado das emissões, não estando adequadamente disperso pelas variáveis meteorológicas e topográficas, ocasionam sérios riscos aos cidadãos (MOREIRA, 2007).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que cerca de sete milhões de óbitos em todo planeta ocorreram por complicações oriundas da poluição do ar a partir de fontes urbanas e industriais em 2012 (MIRAGLIA; GOUVEIRA, 2014).

O efeito smog também é um dos impactos locais causados pela poluição. O smog é formado quando há a condensação de vapor d'água associado com poeira, fumaça e outros poluentes, conferindo um aspecto acinzentado ao ar. É mais nítido em dias frios de inverno, quando ocorrem associados à presença de uma inversão térmica nas grandes metrópoles. A inalação do smog produz uma inflamação respiratória que pode persistir por até 18 horas, provocando tosse, dificuldade em respirar e intensificando asma, alergias e problemas cardíacos (MIRANDA e BAPTISTA, 2008).

Os impactos regionais são aqueles observados distantes das fontes. Mota (2000) menciona que um dos principais impactos regionais é a chuva ácida. As nuvens ácidas (formadas pelos gases NO_x e SO₂) podem deslocar-se levando seus efeitos insalubres a regiões onde estes gases não são encontrados frequentemente. Os óxidos de enxofre e nitrogênio são precursores da deposição ácida, cujos efeitos estão ligados à acidificação de solos, lagos e rios, afetando negativamente a biota e ecossistemas aquáticos e terrestres, distantes da fonte de emissão (VIEIRA FILHO, 2011). Além disso pode interferir no desenvolvimento da vegetação, além de deteriorar muitos dos materiais empregados na construção civil e nos monumentos históricos.

O Quadro 1 apresenta um retrato geral dos principais poluentes, bem como suas características, origens principais e seus efeitos ao meio ambiente.

Quadro 1- Fontes e características dos principais poluentes na atmosfera.

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais no Meio Ambiente
Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5})	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias. Faixa de tamanho < 2,5 µm.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade, contaminação do solo e água.
Partículas Inaláveis (MP₁₀) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho <10 µm.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), poeira ressuspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade, contaminação do solo e água.
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho <100 µm.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol, marinho e solo.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade, contaminação do solo e água.
Dióxido de Enxofre (SO₂)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforo. Pode ser transformado a SO ₂ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante percussor dos sulfatos e um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel, fertilizantes.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.

Quadro 1- Fontes e características dos principais poluentes na atmosfera. (Continuação)

Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.
---------------------------------	----------------------------------	---

Fonte: Adaptado de CETESB (2011).

3.3 Legislação no Brasil

Dentre os países da América do Sul, o Brasil foi protagonista e precursor para criação de legislação voltada para emissões atmosféricas, principalmente as veiculares. A legislação brasileira já conta com amplo amparo legal para medidas de controle ambiental (LOUREIRO, 2005). O Quadro 2 explana os legados das resoluções ambientais que tratam de poluição atmosférica ao longo da história.

Quadro 2- Legislações brasileiras acerca de poluição atmosférica.

Resolução	Definições
Resolução CONAMA nº 18 de 06/05/1986	Cria o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), estabelecendo um cronograma de redução gradativa da emissão de poluentes para veículos automotores tanto leves quanto pesados. O PROCONVE deu prioridade ao segmento de veículos leves devido ao crescente número destes e sua utilização intensiva
Resolução CONAMA nº 5 de 15/06/1989	Criou o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. A fixação de parâmetros para a emissão de poluentes gasosos e materiais particulados (materiais sólidos pulverizados) por fontes fixas começou a ser efetuada por meio dessa Resolução, que determinou a necessidade de se estabelecer limites máximos de emissão e a adoção de padrões nacionais de qualidade do ar.

Quadro 2- Legislações brasileiras acerca de poluição atmosférica. (Continuação)

Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990

Dispôs sobre os padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Teve como base normas (ou recomendações) da Organização Mundial da Saúde, que levam em conta limites de concentração compatíveis com a saúde e o bem-estar humanos. Em seu art. 1º, a Resolução nº 3/1990 define que são padrões de qualidade ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Resolução CONAMA nº 8 de 06/12/1990

Estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes de poluição. Esta resolução complementou o PRONAR estabelecendo limites para a concentração de determinados poluentes no ar.

Resolução CONAMA nº 382 de 26/12/2006

Estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Cabe ressaltar que a Resolução CONAMA nº 382/2006 representou uma mudança de abordagem do tema. Nas resoluções anteriores do PRONAR, considerava-se a qualidade do ar como parâmetro básico, admitindo-se emissões maiores onde as condições atmosféricas fossem mais favoráveis. Pela Resolução nº 382/2006, fixam-se limites específicos de emissão para cada tipo de fonte ou combustível utilizado. Ele se aplica a todas as fontes fixas instaladas a partir da sua vigência, ou seja, 2007.

Quadro 2- Legislações brasileiras acerca de poluição atmosférica. (Continuação)

Resolução CONAMA nº 436 de 22/12/2011	Complementa as Resoluções nº 05/1989 e nº 382/2006 e estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.
Resolução CONAMA nº 491 de 19/11/2018	Revogou expressamente as Resoluções n. 03, de 28 de junho de 1990, e a Resolução n. 05, de 15 de junho de 1989, ambas do CONAMA. Também vem atender as diretrizes da Organização Mundial de Saúde – OMS, e adota novos padrões de medição de qualidade do ar.

Fonte: Adaptado de MMA (2018)

3.4 Padrões de Qualidade do Ar

A inquietação mundial acerca das mudanças climáticas está presente nos diferentes setores da sociedade. É perceptível aos governos e à comunidade científica que a contaminação atmosférica traz implicações severas. Assim sendo, se faz necessário estabelecer estratégias capazes de mensurar e evidenciar os impactos da poluição atmosférica, surgindo o dever de se estabelecer um limite tolerável para a emissão de poluentes no ar, sem que isso cause mal as pessoas. (GERAVANDI et al, 2015)

Baseados em estudos científicos, nos quais foram definidos os inúmeros níveis de exposição aos diversos poluentes e seus respectivos efeitos sobre a saúde e fixados em níveis que propiciem uma conjuntura segura, foram estabelecidos os padrões de qualidade do ar.

No Brasil, os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (PQAr) foram estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio da resolução nº 491 de 19/11/2018, com o objetivo de controlar e recuperar a qualidade do ar, precavendo sua alteração. Os Padrões definem legalmente um limite máximo para a concentração de um

componente atmosférico, sem que os mesmos causem problemas, garantindo a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas, meio ambiente e materiais.

Segundo a Resolução CONAMA 491/2018, os padrões são divididos em duas principais categorias: padrões de qualidade do ar intermediários (PI) e padrão de qualidade do ar final (PF). Essa distinção ocorrerá em quatro fases sequenciais para adoção de valores decrescentes de concentração. Os intermediários são padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em 3 etapas (PI-1, PI-2, PI-3), já a última etapa tem valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005. A primeira etapa PI-1 já entrou em vigor com a publicação da Resolução CONAMA 491/2018.

Com a nova resolução também foram adicionados novos poluentes a ser monitorados. O Chumbo é um desses, porém é descrito como um parâmetro a ser monitorado em áreas específicas, em função da tipologia das fontes de emissões atmosféricas e a critério do órgão ambiental competente. Analogamente as partículas totais em suspensão (PTS) e o material particulado em suspensão na forma de fumaça (FMC) surgem como parâmetros auxiliares, a serem utilizados em situações específicas, que serão definidas pelo órgão ambiental.

Os poluentes atmosféricos regulamentados pela Resolução CONAMA 491/2018, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Padrões de qualidade do ar segundo a Resolução CONAMA 491/2018.

Poluente	Período de referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		$\mu\text{g m}^{-3}$			ppm	
MP ₁₀	24h	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
MP _{2,5}	24h	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-

Tabela 1- Padrões de qualidade do ar segundo a Resolução CONAMA 491/2018.
(Continuação)

SO₂	24h	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
NO₂	1h	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
O₃	8h	140	130	120	100	-
Fumaça	24h	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
CO	8h	-	-	-	-	9
PTS	24h	-	-	-	240	-
	Anual	-	-	-	80	-
Pb	Anual	-	-	-	0,5	-

Fonte: Adaptado Resolução 491/2018.

3.5 Material Particulado

A classe de poluentes constituídas de poeiras, fumaças e todo o tipo de material sólido e líquido que, devido ao pequeno tamanho, mantém-se suspenso na atmosfera é definida como Material Particulado (MP). Esse é encontrado desde as fumaças expelidas pelas chaminés industriais e veículos automotores, até a poeira ressuspensa pela movimentação nas vias (PCPV, 2005).

Como já mencionado, pode ser classificado em: partículas totais em suspensão (PTS), partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm (MP_{10}), partículas finas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$), partículas ultrafinas com diâmetro aerodinâmico inferior a 0,1 μm ($\text{MP}_{0,1}$) e partículas sedimentáveis (PS) (GUARIEIRO et al, 2011).

Até 1989, apenas as PTS eram relevantes para a legislação brasileira, ou seja, toda poeira, neblina, aerossol, fumaça ou fuligem composta por material de tamanho menor que 100 μm , devidos aos seus potenciais nocivos à saúde humana (PCPV, 2005). Entretanto a partir de 1990, a legislação brasileira passou a se atentar com as Partículas Inaláveis (PI), menores que 10 μm , originadas do processo de combustão industrial, de veículos automotores e do aerossol secundário (formado na atmosfera), uma vez que pesquisas demonstraram que quanto mais fina a partícula, mais fácil a penetração no aparelho respiratório, agravando os efeitos a saúde (VESILIND e MORGAN, 2011).

Em cidades, a exaustão dos carros a diesel é uma grande fonte de partículas MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$ e $\text{MP}_{0,1}$. O material particulado emitido pelos veículos apresenta uma diversidade de espécies orgânicas e inorgânicas. Dentre as fontes destas espécies pode-se destacar a queima incompleta de combustível e a queima de óleo lubrificante que emitem partículas composta de material parcialmente queimado, matéria orgânica do combustível e do óleo lubrificante, carbono elementar, sulfatos, mercaptanas, óxidos metálicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA, nitro-HPA), compostos reduzidos de enxofre, entre outros componentes (GUARIEIRO et al, 2011).

Devido essa constituição de metais pesados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, o MP é o poluente ambiental mais associado a danos à saúde humana, tanto em estudos clínico-epidemiológicos como experimentais. As consequências são mais expressivas se apresentam quando as partículas se depositam nos alvéolos e bronquíolos respiratórios (SEINFELD, 2016).

Estudos epidemiológicos associaram a exposição às partículas à incidência de mortes prematuras, asma crônica e aumento de internações hospitalares de crianças e pessoas idosas por doenças respiratórias e cardiovasculares, além de outras enfermidades como o câncer, as mal formações congênitas, a restrição do crescimento intrauterino e distúrbios da fertilidade (FREITAS, 2013).

Além do diâmetro das partículas e composição dos poluentes, outros fatores devem ser levados em consideração nos estudos das implicações causadas pela poluição por MP, sendo elas: as condições individuais e socioeconômicas da população da área afetada. Os elementos individuais dizem respeito à constituição genética, idade, comorbidades e condições de vida e trabalho das pessoas (proximidades de fontes emissoras ou grande tráfego de veículos). Enquanto que os fatores socioeconômicos envolvem a conjuntura das questões de saúde pública da região, bem como a disponibilidade e acesso aos serviços de saúde, saneamento básico, nutrição da população e risco de exposição aos poluentes. Nas grandes cidades os níveis de dispersão dos poluentes variam, acarretando em regiões onde a concentração de poluentes é muito maior do que em outras, agravando a ocorrência de doenças (FERNANDES, 2010).

3.6 Dispersão Atmosférica

Na atmosfera, os processos de dispersão de poluentes desempenham papel fundamental, pois permitem que a concentração dos poluentes assumam nível de menor risco para os seres vivos. A determinação das concentrações de poluentes lançados na atmosfera é um elemento importante na previsão de impactos ambientais causados por emissões de gases industriais. Dentre eles ressaltam-se os possíveis riscos aos quais a população está submetida durante a dispersão atmosférica de poluentes resultantes de indústrias petroquímicas, siderúrgicas, de papel e celulose e cimenteiras, por exemplo (CAPUTO, GIMENEZ e SCHLAMP, 2003).

A dispersão de poluentes na atmosfera a partir de fonte fixa é influenciada tanto pelas características da fonte emissora (velocidade e temperatura do gás de saída, altura e diâmetro da chaminé), quanto pelas condições meteorológicas, tais como vento, temperatura e estabilidade atmosférica, pressão, entre outras (RODRIGUES, 2016).

É evidente que estudos para avaliar essa dispersão na atmosfera têm estado cada vez mais em pauta, uma vez que observa-se um crescimento de emissões advindas do crescimento das áreas urbanas e industriais. Na maioria dos casos, estes centros localizam-se em regiões heterogêneas em termos de relevo, tipo de solo e ocupação, dificultando a previsão de dispersão. Como base nisso, houve um avanço significativo no número de pesquisas e publicações sobre a dispersão atmosférica das últimas décadas,

principalmente realizadas em grandes centros urbanos. A previsão dos níveis de concentração de poluentes tornou-se uma condição imprescindível para fins de determinação dos danos a serem provocados futuramente por novas fontes ou mesmo para alteração de fontes existentes (TADANO, 2010; ARMSTRONG et al, 2005; RAMOS, 2015).

A concentração de um contaminante presente no ar pode ser, dessa forma, descrita pelos processos de advecção e difusão. A advecção consiste no transporte do poluente devido ao movimento do fluido. Na difusão, o transporte das moléculas ocorre de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração (ANDREÃO, 2016, SOCOLOFSKY; JIRKA, 2005).

A equação diferencial que descreve o transporte de poluentes é obtida a partir do conceito de conservação de massa em um meio isotrópico (FISCHER et al, 1979).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] - \left[u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \right] + R(C, t) + S(x, y, z, t) \quad (1)$$

Em que,

C: concentração da espécie química considerada [M L⁻³];

u: componente da velocidade segundo a direção x [L T⁻¹];

v: componente da velocidade segundo a direção y [L T⁻¹];

w: componente da velocidade segundo a direção z [L T⁻¹];

D: coeficiente de difusão molecular da espécie [L² T⁻¹];

R: taxa de geração da espécie devido a reações químicas [M L³ T⁻¹];

S: taxa de extinção do poluente no volume de controle [M L³ T⁻¹];

x, y, z = distância ao longo do respectivo eixo coordenado [L].

A primeira parcela do lado esquerdo da igualdade refere-se à variação da concentração da espécie química no tempo e a primeira parcela do lado direito é referente aos processos difusivos, e as demais representam à quantidade de poluente que sai do volume de controle devido á advecção, às reações químicas que podem ocorrer no volume de controle e a última parcela refere-se à geração de poluentes no volume de controle.

3.7 Atributos de Superfície e Micrometeorológicos

3.7.1 Atributos de superfície

- **O comprimento da rugosidade (Z_0)**

A definição da rugosidade de uma superfície é fundamental para estudos em escala micrometeorológica. O comprimento de rugosidade, de modo geral, corresponde a uma altura em que uma variável meteorológica qualquer; como a velocidade do vento, temperatura ou umidade, é extrapolada para um valor de superfície por meio de uma relação logarítmica; e assim, descreve a força com que a superfície atua absorvendo os impactos mecânicos. A estimativa de Z_0 é realizada por meio de dados de perfis verticais do vento e extrapolada para a altura em que o vento é nulo (BRUTSAERT, 1979; ARYA, 1988). Em estudos micrometeorológicos são assumidos diferentes valores de Z_0 dependendo das características da superfície e da estação do ano.

- **Albedo**

Segundo Leivas (2014), quando a radiação solar incide em uma superfície parte dela é refletida e outra extinta. O albedo é a relação da energia refletida sobre a incidente, ou seja, a capacidade das superfícies refletirem a radiação incidente sobre elas. Esse atributo varia com as características das superfícies, e como exemplos, a areia e a neve que possuem valores altos, enquanto que superfícies escuras como em asfaltos e florestas, possuem absorvância maior que sua refletância; o albedo é menor.

- **Razão de Bowen**

Bowen (1926) introduziu o conceito de razão de Bowen como sendo a relação entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (proporcional à taxa de evaporação da superfície para o ar) de uma superfície. A fim de representar a importância da concentração do vapor d'água nos fluxos turbulentos atmosféricos.

3.7.2 Atributos Micrometeorológicos

- **Radiação Solar Global (R_n)**

Corresponde ao total de radiação que atinge o solo, ou seja, é a soma de toda a radiação direta, aquela que atingiu o solo sem sofrer desvios, com a radiação difusa, aquela que foi desviada de seu caminho original e atingiu o solo (LEIVAS, 2014).

- **Fluxo de Calor Sensível (H)**

Segundo Stull (1991), o ciclo diário da camada limite atmosférica é altamente variável. Durante o dia, a atmosfera é aquecida pelo fluxo calor sensível da superfície do solo. Esse atributo é definido como a transferência de calor sensível por unidade de tempo e área que ocorre quando há uma diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar.

- **Velocidade de fricção (u^*) e Comprimento de Monin-Obukhov (L)**

A Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) surgiu em 1954 quando Monin-Obukhov apresentaram a hipótese de similaridade para fluxos verticais turbulentos sobre superfícies uniformes, em condições de estratificação térmica. Esta hipótese é usualmente aplicada para a Camada Superficial, onde os fluxos verticais passam a ser considerados constantes com a altura e onde ocorre a combinação da turbulência mecânica com a convectiva (DA SILVA, 2000).

O L é uma estimativa que caracteriza a estabilidade e a espessura da camada superficial (MORAES et al, 2008) onde o mecanismo predominante de geração de turbulência é o gradiente de velocidade do vento que representa os efeitos das tensões de cisalhamento sobre a superfície, denominada velocidade de fricção (u^*). Em linhas gerais, os valores de L indicam a predominância da turbulência na camada limite superficial.

- **Gradiente vertical de temperatura (dT/dZ)**

As variações observadas da temperatura pelas camadas atmosféricas (dT/dZ) é designada por gradiente vertical da temperatura. Essa variação auxilia na análise de estabilidade da atmosfera seca comparando o gradiente vertical de temperatura com a taxa de variação da temperatura num processo adiabático (designada em inglês por *lapse rate*) (ZANNETTI,1990).

- **Velocidade Convectiva (W^*)**

A componente vertical de velocidade (W^*) advém da intensa convecção térmica e contribui para a manutenção da estrutura vertical da camada de mistura até a região

próxima ao topo da CLP, onde ocorre uma grande variação vertical de concentração de poluentes atmosféricos (MARQUES FILHO, 2004).

3.8 Modelos Matemáticos de dispersão atmosférica

Inserindo-se no contexto atual da avaliação com meios computacionais da qualidade do ar em zonas urbanas, o uso de uma ferramenta de simulação de dispersão de poluentes em meio atmosférico é bastante útil, pois permite realizar simulações e previsões das concentrações de um determinado poluente (SCHLINK et al, 2006).

Dessa maneira, os modelos oferecem à população a oportunidade de evitar exposições a concentrações elevadas; às empresas, condições de prever investimentos em equipamentos que permitam reduzir emissões na atmosfera; e aos órgãos públicos, a possibilidade de realizar questionamentos acerca de novos empreendimentos, cujos efluentes atmosféricos contribuam para a degradação das condições de qualidade do ar. (SCHLINK et al, 2006).

Os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos utilizam de equações matemáticas para descrever a atmosfera, dispersão e os processos físicos e químicos oriundos de uma pluma emitida pelas fontes. Os modelos são usuais para predições de impactos no meio atmosférico tanto de fontes fixas quanto das móveis (MARTINS, FORTES, LESSA, 2015).

A dispersão atmosférica é um processo complexo, pois o escoamento da CLP é conduzido por fenômenos turbulentos. Portanto, os modelos de transporte e dispersão de poluentes devem ser capazes de simular os efeitos da turbulência para obter resultados assertivos. (MORAES, 2010, MOREIRA e TIRABASSI 2004).

A maioria dos modelos de dispersão de plumas baseia-se na teoria estatística de Gauss. Estes modelos empregam várias expressões analíticas a fim de incluir o efeito de obstáculos, topologia, direção/velocidade dos ventos, reações químicas, etc. (MELO et al, 2012).

Segundo Andreão (2016), os modelos de dispersão atmosférica podem ser divididos em duas classes principais, os Eulerianos, que utilizam soluções da equação advecção-difusão (fluxo combinado) em um sistema de referência fixo em relação à Terra e os Lagrangeanos que simulam as trajetórias das partículas de poluentes em um sistema de referência que se desloca de acordo com o movimento das partículas. A principal

diferença desses métodos está na mobilidade do sistema de referência, sendo que o Euleriano se encontra fixo no espaço e o Lagrangeano segue o movimento das partículas (HOINASKI, 2015).

Os modelos Eulerianos consideram o movimento do fluido relacionado a um sistema de referência fixo no espaço, logo mais capazes estimar a dispersão de poluentes sobre a topografia complexa ou a difusão de poluentes reativos. O resultado da modelagem é a concentração do poluente, para um período de tempo e receptor específico (MOREIRA e TIRABASSI 2004).

Também existem os modelos Gaussianos, que podem ser considerados como uma subclasse dos anteriores. Os modelos de pluma Gaussianos são limitados, pois consideram vento horizontal com cisalhamento constante e turbulência homogênea. Essas condições são dificilmente encontradas na CLP, sendo esse tipo de modelo mais usual para fins regulatórios (MORAES, 2004). Como exemplo desse tipo de modelo, temos o modelo AERMOD (*American Meteorological Society/ Environmental Protection Agency Regulatory Model*), que desde abril de 2000 passou a ser o recomendado pela Agência Ambiental dos Estados Unidos (EPA) assim como por diferentes agências estaduais do Brasil.

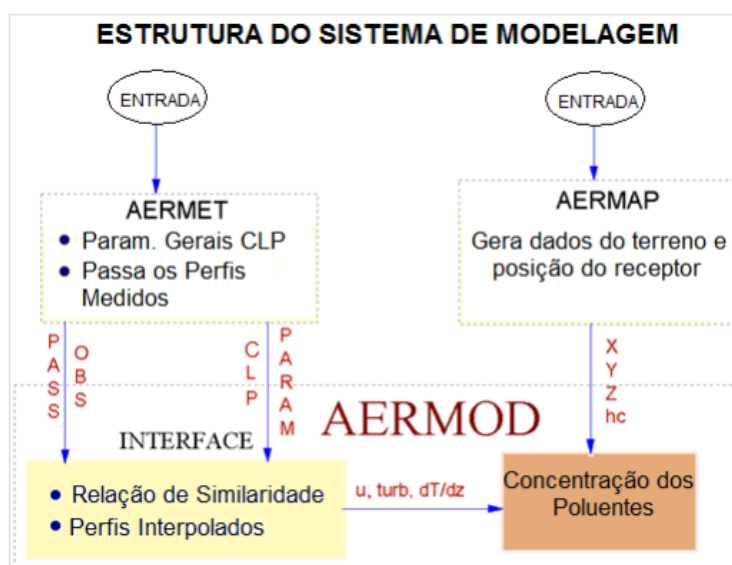
3.9 Modelo AERMOD

A instalação e a manutenção de fontes emissoras de poluentes exigem estudos criteriosos de impacto na qualidade do ar, combinando técnicas de monitoramento e de modelagem computacional. O modelo AERMOD tem sido recomendado pelos órgãos ambientais internacionais para uso no licenciamento de instalações industriais (EPA 2005), além de requisitados em estudos de impacto ambiental (EIA) pela Resolução CONAMA 316/02 como pré-requisito para instalação de empreendimentos de alto potencial poluidor.

O AERMOD é um modelo estacionário de pluma Gaussiana que a partir de dados meteorológicos de superfície e altitude, é capaz de gerar o perfil de variáveis meteorológicas necessário à simulação da dispersão dos poluentes (EPA, 2004; HANNA et al, 2001).

O sistema de modelagem AERMOD consiste em dois pré-processadores e um modelo de dispersão. Um pré-processador de dados meteorológicos AERMET (*AERMIC meteorological preprocessor*) que provê ao AERMOD as informações necessárias para a descrição da Camada Limite Planetária e o pré-processador AERMAP (*AERMIC terrain preprocessor*) utiliza as informações do terreno e de localização das fontes e pontos receptores para posterior uso pelo modelo de dispersão (Figura 3). (EPA, 2004).

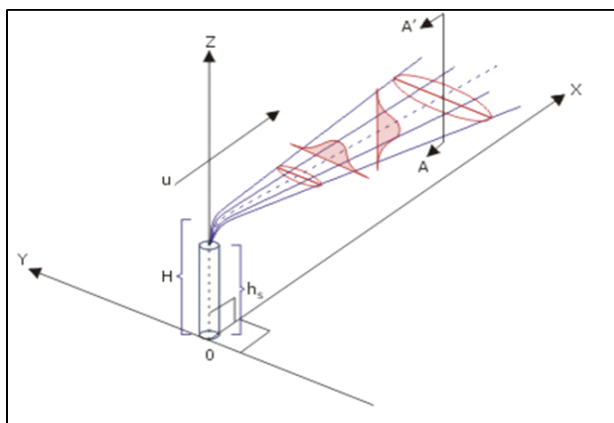
Figura 3- Estrutura do sistema AERMOD



Fonte: Adaptado de EPA (2004)

Na Camada Limite Estável (CLE ou SBL), o modelo assume a distribuição Gaussiana de concentração, tanto na vertical quanto na horizontal (Figura 4). Todavia, na Camada Limite Convectiva (CLC ou CBL), a distribuição horizontal também é assumida como Gaussiana, porém a distribuição vertical é descrita com uma função de densidade de probabilidade Bi-Gaussiana (EPA, 2004). A formulação da dispersão de poluentes na camada limite convectiva, segundo o estudo de Cimorelli et al (2004), representa um dos mais importantes avanços do modelo AERMOD em comparação aos demais modelos regulatórios existentes.

Figura 4- Representação esquemática da pluma Gaussiana



Fonte: Turne (1970)

O modelo é aplicável para áreas urbanas e rurais, para terrenos planos ou complexos e múltiplas fontes (pontuais, área, linha e volume); sendo capaz de caracterizar a camada limite atmosférica, construindo perfis verticais de variáveis meteorológicas com base em medições e extrapolações de medições usando relações de similaridade (EPA, 2004).

4. METODOLOGIA

4.1 Caracterização da região de interesse

A área de interesse do presente estudo integra os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Betim, e a visualização de suas manchas urbanas interligadas pode ser visualizada na Figura 5.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população estimada de Belo Horizonte para 2018 é de 2.501.576 pessoas. A taxa de escolarização de 6 a 14 anos de idade corresponde a 97,6 % da população. Em relação ao meio ambiente 96.2% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 82.7% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 44.2% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio).

Em 2017, o salário médio mensal era de 3.6 salários mínimos e proporção de pessoas ocupadas em relação à população total era de 57.5%. O PIB *per capita* R\$35.122,01, com 48 % da receita oriunda de fontes externas e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) igual a 0,810.

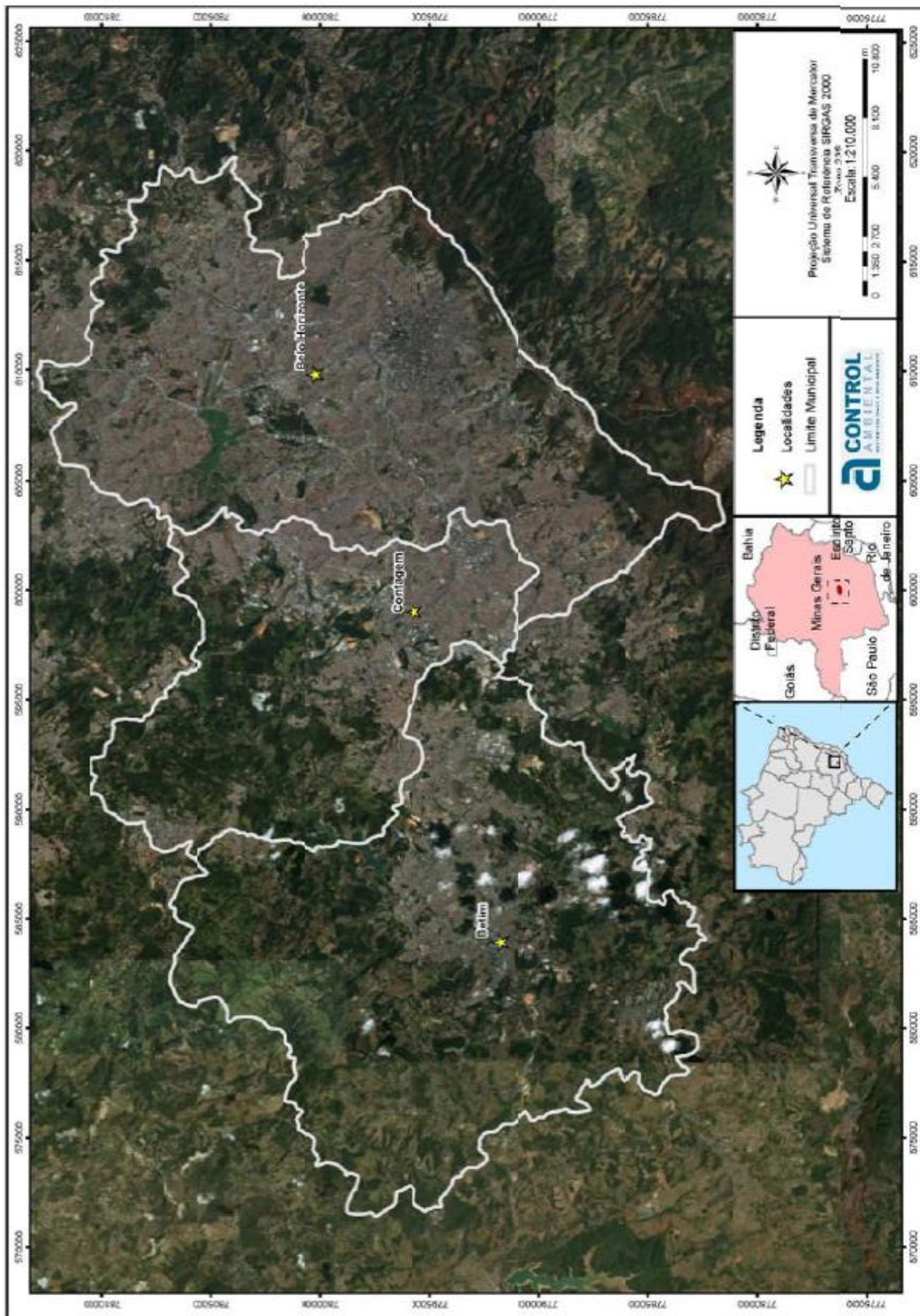
De acordo com relatório do DETRAN, em abril de 2017, a RMBH possuía uma frota de 2.305.451 veículos sendo que a cidade de Belo Horizonte sozinha é responsável por um total de 1.795.487 veículos. O transporte público da região é composto por ônibus urbanos, interurbanos e metrô.

A RMBH é cortada por três importantes rodovias federais, a BR-381 a sudoeste, a BR-040 a sudeste e a BR-262 a leste. Todas estas rodovias estão interligadas pelo Anel Rodoviário, que contorna a região central de Belo Horizonte, e possuem grande fluxo de veículos.

Segundo a classificação de Köppen, a RMBH, é classificada como clima subtropical úmido (Cfa). O clima de Belo Horizonte é tropical de altitude, com verões chuvosos e altas temperaturas e invernos secos. De acordo com as normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (1961-1990) as temperaturas médias variam entre 18° e 23° C durante o ano. A umidade relativa média é de 65% e a média anual de precipitação total é de 1500 mm.

Dentre as fontes existentes na região, esse estudo se limitará as fontes fixas industriais.

Figura 5- Mapa da delimitação dos municípios de Belo Horizonte, Betim e Contagem.



Fonte: FEAM (2018)

4.2 Fontes de emissão e definição dos receptores

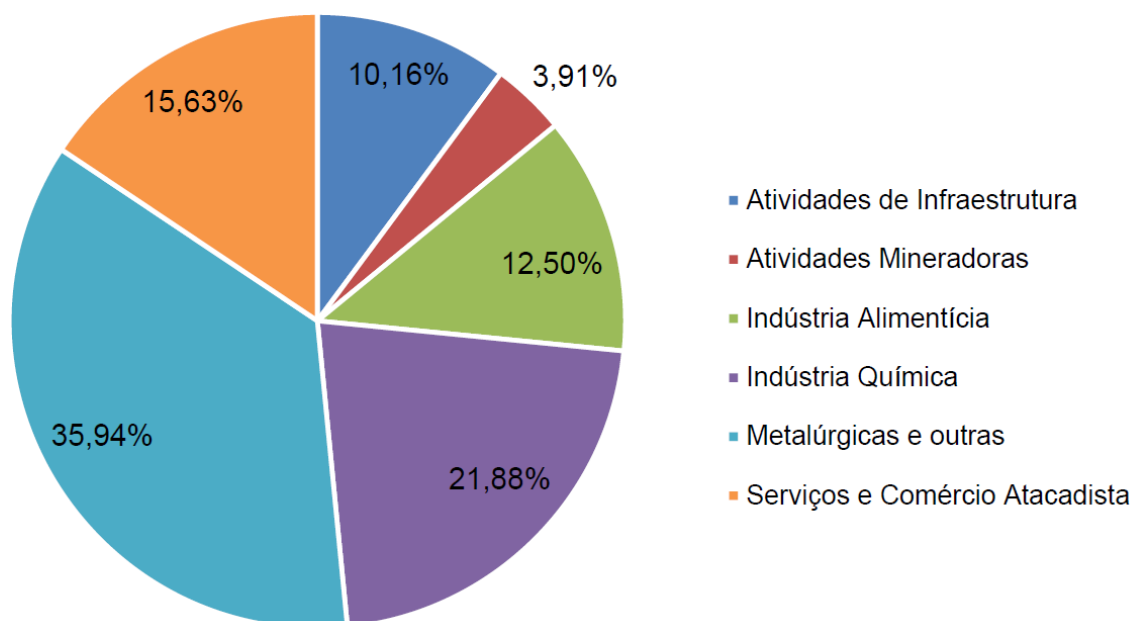
Definiu-se avaliar somente as fontes fixas industriais localizadas na região de interesse. Para isso, coletou-se informações no Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos realizado em parceria entre a FEAM, FIAT e a ECOSOFT, publicado em julho de 2003. Um de seus objetivos foi fundamentar a realização de um dimensionamento e implantação de uma rede otimizada de monitoramento da qualidade do ar e de condições meteorológicas da RMBH (Região Metropolitana de Belo Horizonte).

Apesar de existir uma atualização do inventário de 2003 realizado pela FEAM e a Petrobrás publicado em agosto de 2018, optou-se pela utilização das informações do inventário de 2003, uma vez que esse expõe as características físicas de cada fonte (taxa de emissão, diâmetro e altura da chaminé, temperatura de saída e coordenadas geográficas), dados requeridos pelo modelo AERMOD.

O processo do inventário consistiu na coleta de informações em processos de licenciamento e arquivos técnicos da FEAM e órgãos municipais, seguido de cálculo da emissão de poluentes atmosféricos para cada fonte significativa detectada em cada empresa inventariada. Utilizou-se de procedimentos e modelos de emissão recomendados pela *U.S. Environmental Protection Agency* – EPA. Foram inventariadas ao todo 12 empresas (58 fontes) em Belo Horizonte, 38 empresas (170 fontes) em Contagem e 38 empresas (390 fontes) em Betim.

Para este trabalho, limitou-se às fontes com emissão significativa de MP₁₀. Portanto, para a simulação, escolheram-se 53 fontes de Belo Horizonte, 141 de Contagem e 185 de Betim, totalizando 379 fontes fixas emissoras de material particulado. As indústrias foram classificadas segundo a DN 217/2017 e se dividem nas seguintes tipologias segundo inventário de 2018:

Figura 6- Tipologias das fontes de emissão da RMBH segundo DN 217/2017.



Fonte: FEAM (2018)

Foram estabelecidos três receptores, sendo estes os centros das cidades que compõem a RMBH: Belo Horizonte, Contagem e Betim cujas coordenadas geográficas são descritas na Tabela 3.

Tabela 2- Coordenadas geográficas dos receptores para o modelo AERMOD.

Receptor	Coordenada x (longitude)	Coordenada y (latitude)
Belo Horizonte	611086,00 m E	7797117,00 m S
Contagem	596473,00 m E	7796561,00 m S
Betim	583887,00 m E	7791771,00 m S

Fonte: do Autor

4.3. Cálculo dos parâmetros meteorológicos e de superfície

Os dados meteorológicos consistem em entradas cruciais para os modelos de dispersão de ar. A partir dos dados coletados nas estações meteorológicas e os dados de radiossondagens atmosféricas é possível que o modelo atmosférico determine o *lapse-*

rate e todos os parâmetros micrometeorológicos para as estimativas das turbulências (mecânica e térmica) e a altura da CLP. O procedimento de cálculo foi feito seguindo procedimentos reconhecidos em: Victoria (2013), Zannetti (1990) e Benkley e Schulman (1979).

O pré-processador AERMET do AERMOD processa os dados que contêm os campos meteorológicos gerando dois arquivos distintos: (i) um arquivo de dados de "superfície" (.sfc); e (ii) arquivo de dados de "perfil" (.pfl). O AERMOD é capaz de processar os dados brutos das estações meteorológicas de superfície localizadas no padrão dos EUA, entretanto não é adequado para outras localidades. Dessa forma, os dados de superfície são utilizados nos cálculos das parametrizações micrometeorológicas para a região de interesse.

A construção dos arquivos de meteorologia envolveram as seguintes etapas:

- Compilação de todos os dados meteorológicos representativos necessários para o local do receptor;
- Determinação das características da superfície para o local de aplicação;
- Estimativa de parâmetros escalares;
- Estimativa das alturas de mistura horárias (alturas da camada limite - convectivas e estáveis);
- Formatar todos os dados / informações em formatos de arquivo compatíveis com o AERMOD.

O arquivo de superfície (.sfc) é composto pelos parâmetros que estão descritos e posicionados segundo o Quadro 3:

Quadro 3- Parâmetros necessários ao arquivo de superfície (.sfc).

Posição	Parâmetro
1	Ano
2	Mês
3	Dia
4	Dia Juliano
5	Hora (1 a 24)
6	H- fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$)
7	u^* - velocidade de fricção ($m s^{-1}$)
8	W^* - velocidade convectiva ($m s^{-1}$)
9	dT/dZ - gradiente vertical de temperatura potencial ($K m^{-1}$)
10	$Turb_{ter}$ – altura da turbulência térmica (m)
11	$Turb_{mec}$ – altura da turbulência mecânica (m)
12	L- comprimento de Monin-Obukhov (m)
13	Z_0 - rugosidade superficial (m)
14	Razão de Bowen
15	Albedo
16	u - velocidade do vento à altura de referência do vento ($m s^{-1}$)
17	Direção escalar do vento (medidos no sentido horário a partir do norte verdadeiro) na altura de referência do vento ($^{\circ}$)
18	Altura de referência dos itens 16 e 17 (10 m)
19	Temperatura de referência (K)
20	Altura de referência do item 19 (10 m)

Quadro 3- Parâmetros necessários ao arquivo de superfície (.sfc). (Continuação)

21	Código de Precipitação
22	Precipitação (mm h ⁻¹)
23	Umidade Relativa (%)
24	Pressão da superfície (hPa)
25	Cobertura de nuvens

Fonte: Victória (2013)

O arquivo de perfil (.pfl) é composto pelos parâmetros descritos e devem estar posicionados segundo o no Quadro 4.

Quadro 4- Parâmetros necessários ao arquivo de perfil (.pfl).

Posição	Parâmetro
1	Ano
2	Mês
3	Dia
4	Hora (1 a 24)
5	Altura da medição (m)
6	<i>Flag</i> (1 se for a maior altura medida e 0 as demais)
7	Direção escalar do vento (medidos no sentido horário a partir do norte verdadeiro) na altura de referência do vento (°)
8	u- velocidade do vento à altura de referência do vento (m s ⁻¹)
9	Temperatura de referência (°C)
10	Desvio padrão da direção escalar do vento (°)
11	Desvio padrão da velocidade convectiva (m s ⁻¹)

Fonte: Victória (2013)

Os dados de monitoramento contínuo da qualidade do ar (velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar) foram fornecidos pela Gerência de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões (GESAR) da FEAM pelo site <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/dados>. Os dados disponíveis englobam as 33 estações que compõem a rede de monitoramento automático do Estado de Minas Gerais. Escolheu-se o ano base de 2017, visto que é o mais recente com dados disponibilizados pela gerência.

Além das variáveis meteorológicas, as estações monitoram os seguintes poluentes: partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (MP₁₀), partículas respiráveis (MP_{2,5}), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Utilizou-se dos dados *in situ* de MP₁₀ para efeitos de validação das simulações do AERMOD.

As estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar são constituídas de cabines climatizadas nas quais estão instalados os monitores de poluentes, os sensores meteorológicos, o sistema de aquisição e transmissão dos dados com acesso à internet e demais acessórios necessários à operação e ao funcionamento do sistema.

Definiram-se três estações meteorológicas definidas para cada receptor e estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3- Coordenadas geográficas das estações meteorológicas analisadas.

Estação	Cidade	Coordenadas x	Coordenadas y
Estação Centro- Av. do Contorno	Belo Horizonte	610770.2 m E	7797391.7 m S
Estação Cidade Industrial	Contagem	601143.3 m E	7791916.0 m S
Estação Centro Administrativo	Betim	581960.0 m E	7792016.0 m S

Fonte: <http://www.feam.br/component/content/article/15/1401-mapas-estacoes-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar>

Para a coleta de dados de perfil meteorológico, utilizou as informações da radiossonda do aeroporto de Confins em Belo Horizonte disponível no site de *database*

de radiossondas <https://ruc.noaa.gov/raobs/>. Coletou-se os dados de: Pressão (mbar), Altura (m), Temperatura (°C), Direção do Vento (°) e Velocidade do vento (m/s).

Para esse estudo, escolheu-se avaliar a dispersão de material particulado durante o período de seca. Desse modo, delimitou-se o período de 1 a 23 de junho de 2017 (último dia com informações de perfil meteorológico de Confins).

Por conseguinte, utilizou-se do período em questão para definir os parâmetros de superfície, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros de superfície utilizados no *input* do modelo.

Parâmetro	Valor	Características
Albedo	0.18	Áreas industriais/comerciais/exclui em aeroportos (inverno)
Z ₀	0.70	Áreas industriais/comerciais/exclui em aeroportos (inverno)
Razão de Bowen	3.00	Áreas industriais/comerciais (seca)

Fonte: Victória (2013)

Após coletar as informações meteorológicas e definir o formato dos *inputs* do modelo, deu início aos cálculos das variáveis.

As parametrizações das variáveis micrometeorológicas de H, L, u*, W*, SBL foram realizadas segundo a metodologia proposta por Victoria (2013). As equações dos modelos utilizados são descritas abaixo:

- **Fluxo de Calor Sensível (H):**

$$H = \frac{0,9 \cdot Rn}{\left(1 + \frac{1}{Bo}\right)} \quad (2)$$

Em que,

H- fluxo de calor sensível (W m⁻²);

Rn = Radiação Solar Global;

Bo = Razão de Bowen;

- **Velocidade de Fricção (u^*) e Comprimento de Monin-Obukhov (L):**

$$u^* = \frac{k \cdot u}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right) - \psi\left(\frac{Z_{ref}}{L}\right) + \psi\left(\frac{Z_0}{L}\right)} \quad (3)$$

$$L = -\frac{\rho \cdot Cp \cdot T \cdot (u^*)^3}{k \cdot g \cdot H} \quad (4)$$

$$\psi\left(\frac{Z_{ref}}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1 + \mu}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + \mu^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(\mu) + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

$$\psi\left(\frac{Z_0}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1 + \mu_0}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + \mu_0^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(\mu_0) + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

$$\mu = \sqrt[4]{1 - \frac{16 \cdot Z_{ref}}{L}} \quad (7)$$

$$\mu_0 = \sqrt[4]{1 - \frac{16 \cdot Z_0}{L}} \quad (8)$$

Este procedimento requer a atribuição de um valor inicial para u^* que é encontrado definindo inicialmente os termos ψ para zero, e por meio de um processo iterativo, obteve-se a convergência até que valores consecutivos de L diferem em 1% ou menos.

$$u^* = \frac{k \cdot u}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right)} \quad (9)$$

Em que,

u^* = Velocidade de fricção (m s⁻¹);

L = Comprimento de Monin-Obukhov (m);

k = Constante de Von Karman (0,4);

u = Velocidade do vento de referência (m s⁻¹);

Z_{ref} = Altura de referência (10 m);

Z_0 = Rugosidade superficial (m);

C_p = Calor específico do ar (1006 J kg⁻¹ K⁻¹);

g = Aceleração da gravidade (m s⁻²);

T = Temperatura (K);

H = Fluxo de calor sensível (W m⁻²);

ρ = Densidade do ar (1.225 kg m⁻³).

- **Altura da Camada Estável (SBL)**

$$SBL = 2300 \cdot \sqrt[3]{(u^*)^2} \quad (10)$$

Em que,

SBL = Altura da Camada Estável (m);

u^* = Velocidade de fricção (m s⁻¹).

- **Velocidade Convectiva (W^*)**

$$W^* = \frac{g \cdot H \cdot CBL}{\rho \cdot Cp \cdot T} \quad (11)$$

Em que,

W^* = Velocidade Convectiva ($m \cdot s^{-1}$);

Cp = Calor específico do ar ($1006 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$);

T = Temperatura (K);

H = Fluxo de calor sensível ($W \cdot m^{-2}$);

ρ = Densidade do ar (1.225 kg m^{-3});

CBL = Altura da camada Convectiva (m).

- **Altura da Camada Convectiva (CBL)**

Para o cálculo da CBL, necessitou-se calcular a turbulência térmica e mecânica da camada convectiva. Para a turbulência térmica utilizou-se da metodologia proposta por Zannetti (1990) e para turbulência mecânica a equação descrita por Benkley e Schulman (1979). As fórmulas estão listadas abaixo:

$$Turb_{mec} = 125 \cdot u \quad (12)$$

Onde,

$Turb_{mec}$ = Turbulência Mecânica (m);

u = Velocidade do vento de referência ($m \cdot s^{-1}$).

$$Turb_{ter} = \sqrt{\frac{2 \cdot H \cdot (t - t_0)}{Cp \cdot \rho \cdot (\gamma_d - \gamma)}} \quad (13)$$

Onde,

$Turb_{ter}$ = Turbulência Térmica (m);

t= Hora do dia (h);

t_0 = Horário do nascer do sol (6h);

Cp = Calor específico do ar ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

H= Fluxo de calor sensível ($W \text{ m}^{-2}$);

ρ = Densidade do ar ($kg \text{ m}^{-3}$);

γ_d = Adiabática seca do gradiente vertical;

γ = Adiabática do ar.

$$CBL = SBL + Turb_{ter} + Turb_{mec} \quad (14)$$

4.4 Diretrizes do modelo AERMOD

O modelo AERMOD executável utilizado foi disponibilizado no portal da EPA (*Environmental Protection Agency*): <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#AERMOD>, assim como os arquivos suplementares.

Para executar o modelo foi necessário construir o arquivo *input* que contenha as informações para realização da simulação, como as coordenadas de posição e características físicas das fontes e dos receptores.

Os dados solicitados das características físicas das fontes foram:

- Taxa de emissão (g s^{-1})
- Altura da chaminé (m)
- Diâmetro da chaminé (m)
- Velocidade de saída (convencionada 15 m s^{-1})
- Coordenadas geográficas (UTM)

Definiu-se o período de 24h para a simulação da dispersão do poluente MP_{10} , dessa forma foram obtidas as concentrações médias do período de 24h para os pontos receptores para o período de julho de 2017.

Após as estimativas dos parâmetros meteorológicos, organizou-se os arquivos “.sfl” e “.pfl”, que continham as parametrizações das variáveis micrometeorológicas no arquivo de entrada para a estimativa da CLP dentro do modelo AERMOD.

Alocou-se os receptores, com as origens definidas no centro das cidades de Belo Horizonte, Contagem e Betim e determinou-se que o resultado das concentrações fossem alcançados para coordenadas polares que variam de 10° em 10° . Além disso definiu-se as distâncias do centro do receptor que seriam estudadas para avaliar a dispersão dos poluentes: 100, 200, 300, 400 e 500 m.

Assim como o pré-processador AERMET, o pré-processador AERMAP não é adequado para uso padrão fora dos EUA em sua forma adquirida devido a especificidade das informações. Portanto, para o presente estudo determinou-se a utilização de terreno simples sem as informações topográficas utilizadas usualmente.

4.5 Modelagem estatística

4.5.1 Linguagem R

O tratamento estatístico de dados foi concretizado por programação em ambiente R versão 3.4.4. A linguagem R consiste de uma linguagem estatística, com código-fonte aberto, no qual é possível realizar tratamentos estatísticos multivariados, e manejo de dados (Carslaw, D. C. and K. Ropkins, 2012 ;R Core Team, 2017).

A entrada de dados no R das variáveis meteorológicas foi realizada a partir de arquivos no formato .csv (coma separated values). Após os cálculos descritos na secção 3.2, utilizou-se códigos em linguagem R para realização dos devidos tratamentos estatísticos de correlação entre os parâmetros e construção dos gráficos horários das alturas médias da CBL e SBL. Dentre os pacotes e bibliotecas utilizadas encontram-se: *openair*, *MASS*, *corrplot* (Carslaw, D. C. and K. Ropkins, 2012 ;R Core Team, 2017).

4.5.2 Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r), define o grau de associação entre duas variáveis quantitativas e exprime o grau de correlação através de valores situados entre -1 e 1.

Quando o coeficiente de correlação se aproxima de 1, nota-se uma relação linear positiva. Enquanto que quando o coeficiente se aproxima de -1, há uma correlação negativa. Calculou-se as correlações em porcentagem.

$$r = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{var(x) \cdot var(y)}} \quad (15)$$

Em que,

x, y = variáveis a serem correlacionadas

4.5.3 Análise de Cluster

A análise de cluster reuniu as variáveis meteorológicas por suas similaridades. O principal objetivo desse tipo de análise foi maximizar a homogeneidade e heterogeneidade dos grupos. (BURDORF, 2013).

O dendrograma é um diagrama de árvore que exhibe os grupos formados por agrupamento de observações em cada passo e em seus níveis de similaridade, o qual foi obtido a partir de linguagem de programação R com o pacote “*openair*” segundo Carslaw e Ropkins, (2012). Utilizou-se do Método Hierárquico de Ward a partir da Distância Euclidiana que consiste em uma métrica contínua que pode simular geometricamente uma distância entre dois pontos. No *Single Linkage*, a distância entre dois clusters é a distância entre os pontos de dados mais próximos do outro cluster. A partir de

coordenadas X e Y entre os *clusters*, desenha-se uma linha diagonal reta entre as duas variáveis segundo a equação:

$$D = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y)^2} \quad (16)$$

Em que,

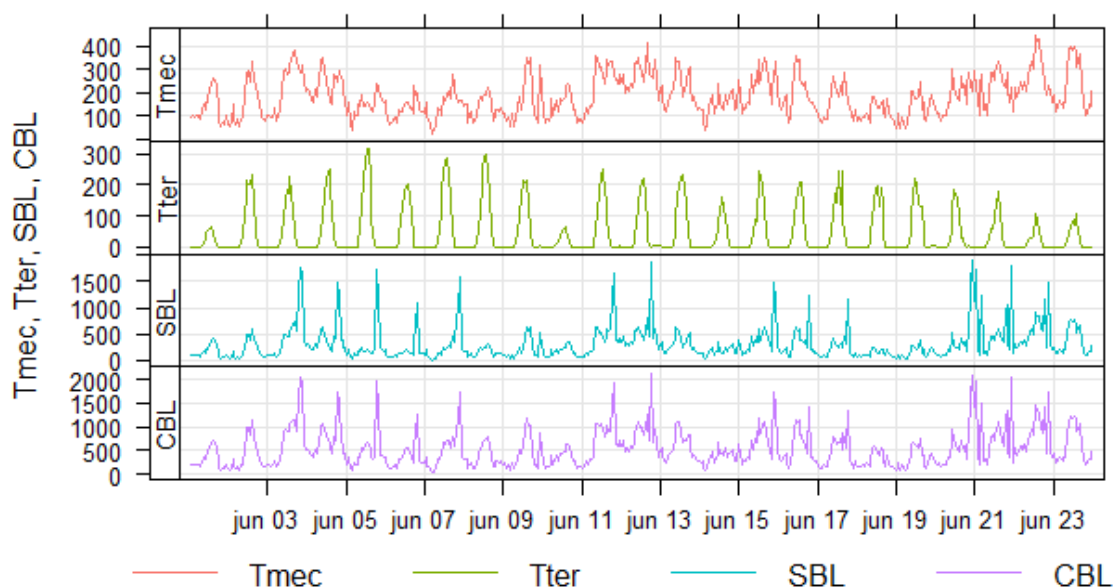
X,Y = coordenadas entre os *clusters*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Turbulência Atmosférica e a Camada Limite Planetária da RMBH

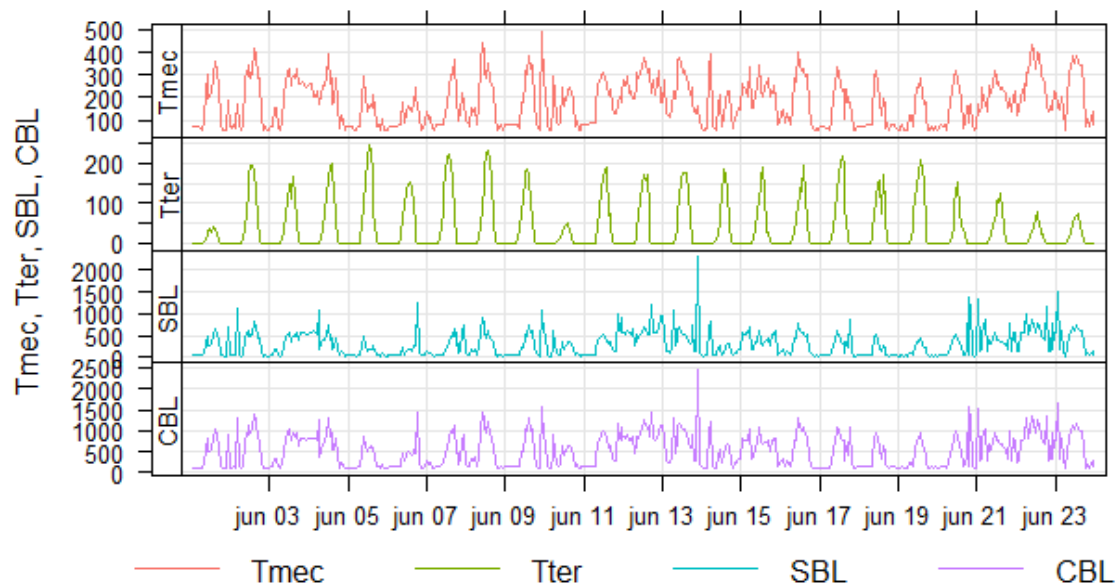
As figuras 7 a 9, apresentam o comportamento temporal da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), Camada Limite Convectiva (CBL) e Camada Limite Estável (SBL) para o período avaliado para Belo Horizonte, Contagem e Betim, na qual permite-se avaliar o comportamento das turbulências e a influência nas camadas estável e convectiva.

Figura 7- Perfis das alturas (m) da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), CBL e SBL para Belo Horizonte.



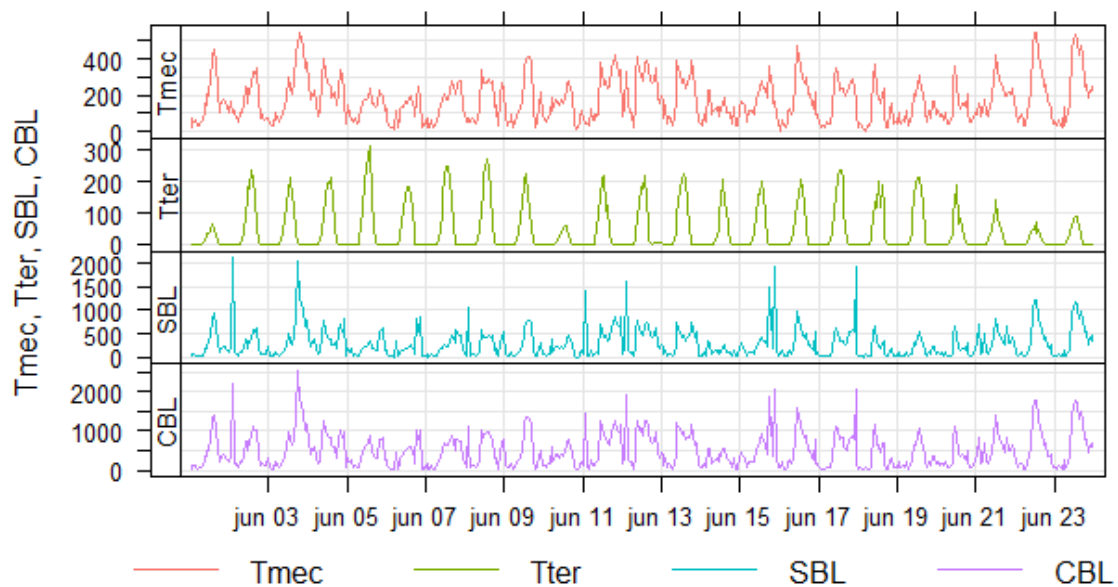
Fonte: Do Autor.

Figura 8- Perfis das alturas (m) da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), CBL e SBL para Contagem.



Fonte: Do Autor.

Figura 9- Perfis das alturas (m) da Turbulência Térmica (Tter), Turbulência Mecânica (Tmec), CBL e SBL para Betim.



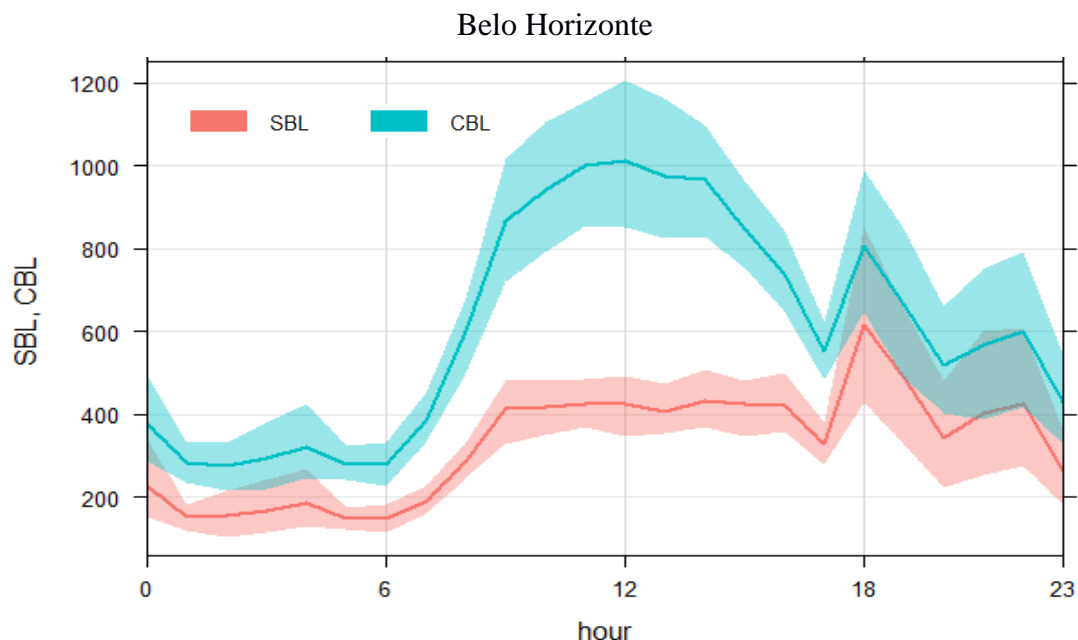
Fonte: Do Autor.

Verifica-se nas Figuras 7 a 9 que a turbulência mecânica em todos os casos predomina sobre a térmica, especialmente Contagem que obteve os menores valores de turbulência convectiva, devido a parametrização sugerida por Victória (2013) para a turbulência mecânica. Dessa forma, o cisalhamento dos ventos, e a turbulência mecânica são superestimados. Cabe ressaltar ainda que, os dados de Contagem apresentaram maiores falhas nos campos meteorológicos utilizados nas parametrizações.

Observa-se que a turbulência térmica é apresentada em picos, isso é devido ao fato das baixas quantidades de radiação solar após o pôr-do-sol (18h). Sendo assim, considera-se que a camada convectiva é influenciada significativamente pela turbulência térmica apenas durante o dia.

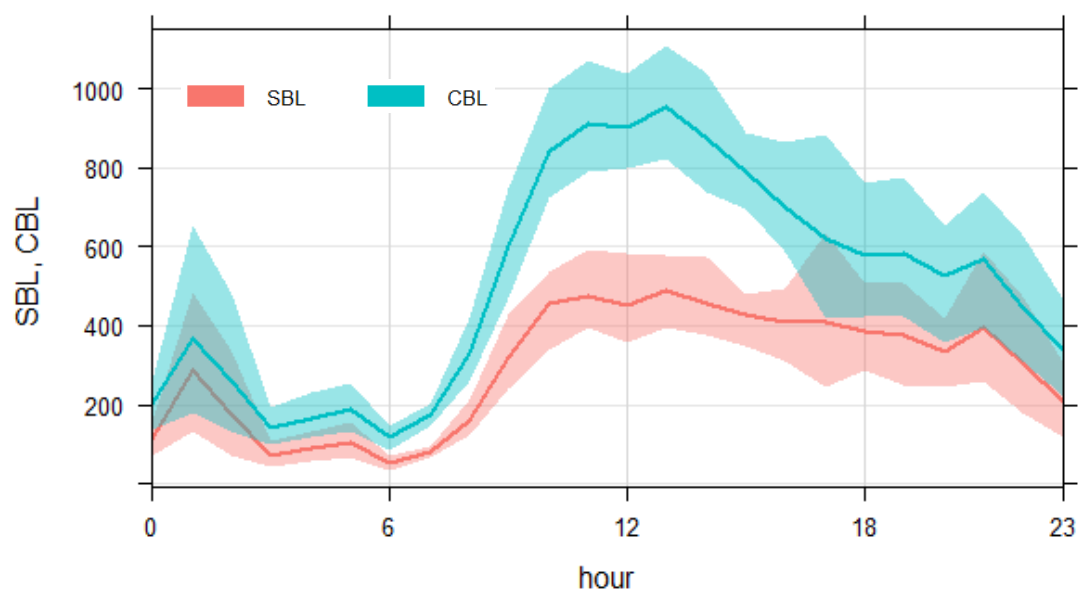
Nas Figuras 10 a 12 encontram-se os resultados referentes às alturas da CBL e SBL. Realizou-se médias horárias a fim de determinar o comportamento médio das camadas durante o dia. Além disso, aferiu-se o perfil das turbulências mecânica e térmica durante o período estudado.

Figura 10- Perfil horário (m) com intervalo de confiança da SBL e CBL da cidade de



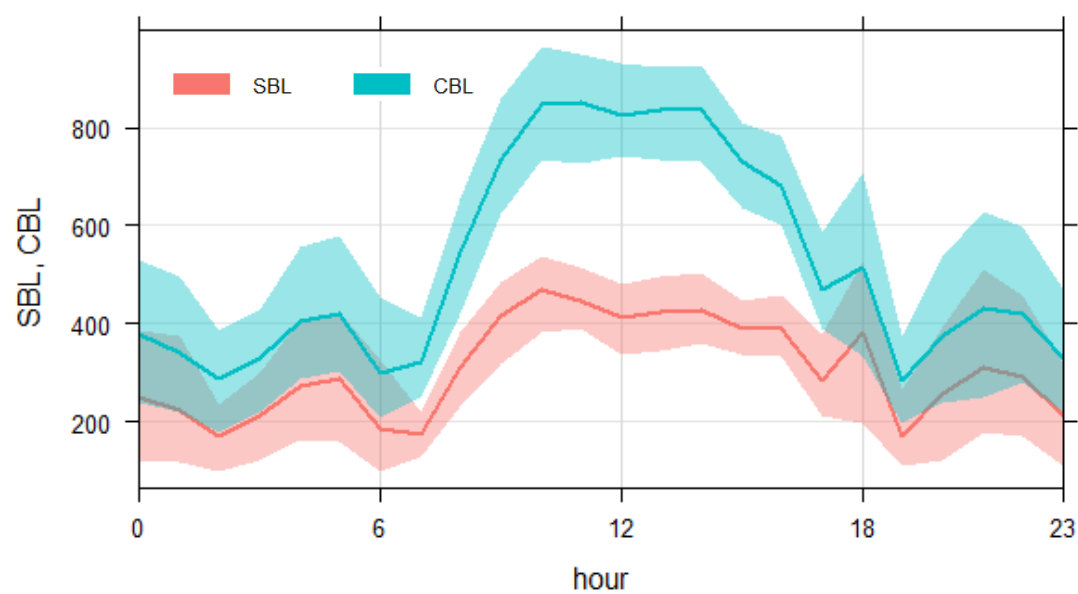
Fonte: Do Autor.

Figura 11- Perfil horário (m) com intervalo de confiança da SBL e CBL da cidade de Betim



Fonte: Do Autor.

Figura 12- Perfil horário (m) com intervalo de confiança da SBL e CBL da cidade de Contagem.



Fonte: Do Autor.

A altura da CBL é maior que a SBL em todos os casos, pois o escoamento do ar é fortemente influenciado tanto pelas tensões cisalhantes quanto as forças de empuxo térmico devido à sua interação com a superfície terrestre, enquanto que a SBL é influenciada basicamente pelas tensões cisalhantes. Dessa forma, pode-se perceber que a turbulência térmica tem um papel fundamental durante o fotoperíodo, período no qual a CLP atinge o seu valor máximo.

Com relação a dispersão atmosférica na microescala meteorológica, os ventos são levemente influenciados pelo escoamento de ar acima e pelos efeitos de fricção, topografia e trocas de calor com a superfície. Ao se avaliar as Figuras de 10 a 12, observa-se que as menores alturas da CBL foram encontradas na cidade de Contagem, enquanto que as maiores em Belo Horizonte. Desse modo espera-se que a dispersão de poluentes seja menor em Contagem do que em Belo Horizonte nesse período.

Observando o perfil de Belo Horizonte, pondera-se a ocorrência do colapso da camada de mistura, visto que após obter valores elevados no momento do pôr-do-sol (17-18h), é sucedido por uma queda brusca de tamanho, devido à ausência da radiação solar e queda de temperatura, predominando a turbulência mecânica pela ação dos ventos. Esse fenômeno intensifica o processo de inversão térmica, o qual permite que os contaminantes permaneçam na camada inferior da atmosfera impedindo de se dispersarem.

Verifica-se que a altura da camada de mistura não é constante, variando com o tempo no ciclo diário, sendo influenciada por variáveis, como a aceleração de Coriolis, a velocidade do vento, rugosidade da superfície e processos de troca de calor. Ressalva-se, a influência da radiação solar no sistema, uma vez que o aquecimento da superfície terrestre após o nascer do sol (6h) acarreta no aumento do fluxo de calor sensível e intensifica a ação das termas na amplificação da turbulência térmica convectiva, e conseqüentemente eleva a altura da CBL. No período noturno, com ventos mais fracos, a espessura da camada limite turbulenta é muito menor que durante o dia. A influência do resfriamento do solo, que ocorre durante a noite por emissão de radiação infravermelha, é a causa desta diminuição dessa camada.

Entretanto, segundo Rodrigues (2016), o mês de junho é caracterizado por temperaturas mais baixas, não sendo favoráveis à dispersão de poluentes, pois sem as

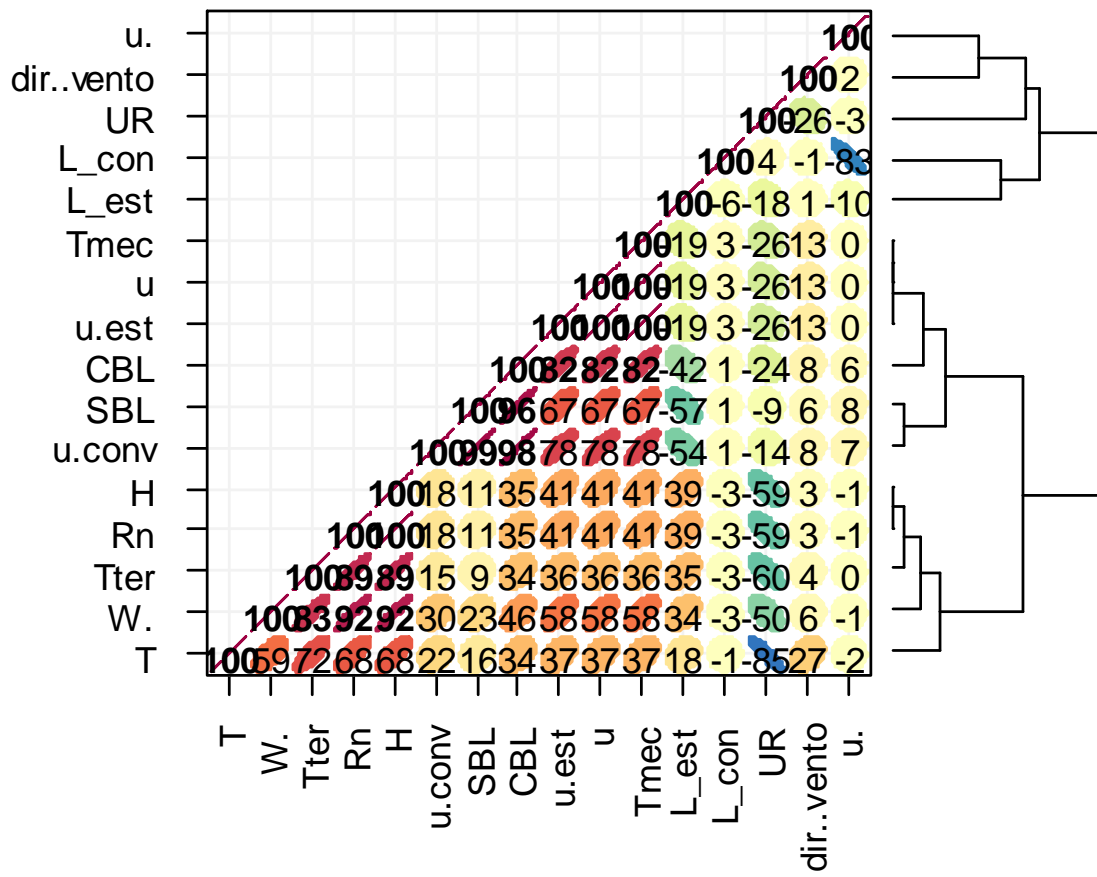
elevadas temperaturas da primavera e verão, não há um aumento relativo da camada de mistura planetária.

As condições da camada atmosférica estável (SBL) têm forte influência na dispersão dos poluentes, pois a energia cinética turbulenta é menor e a dispersão dos poluentes é diminuída.

5.2 Estatísticas dos Parâmetros Micrometeorológicos

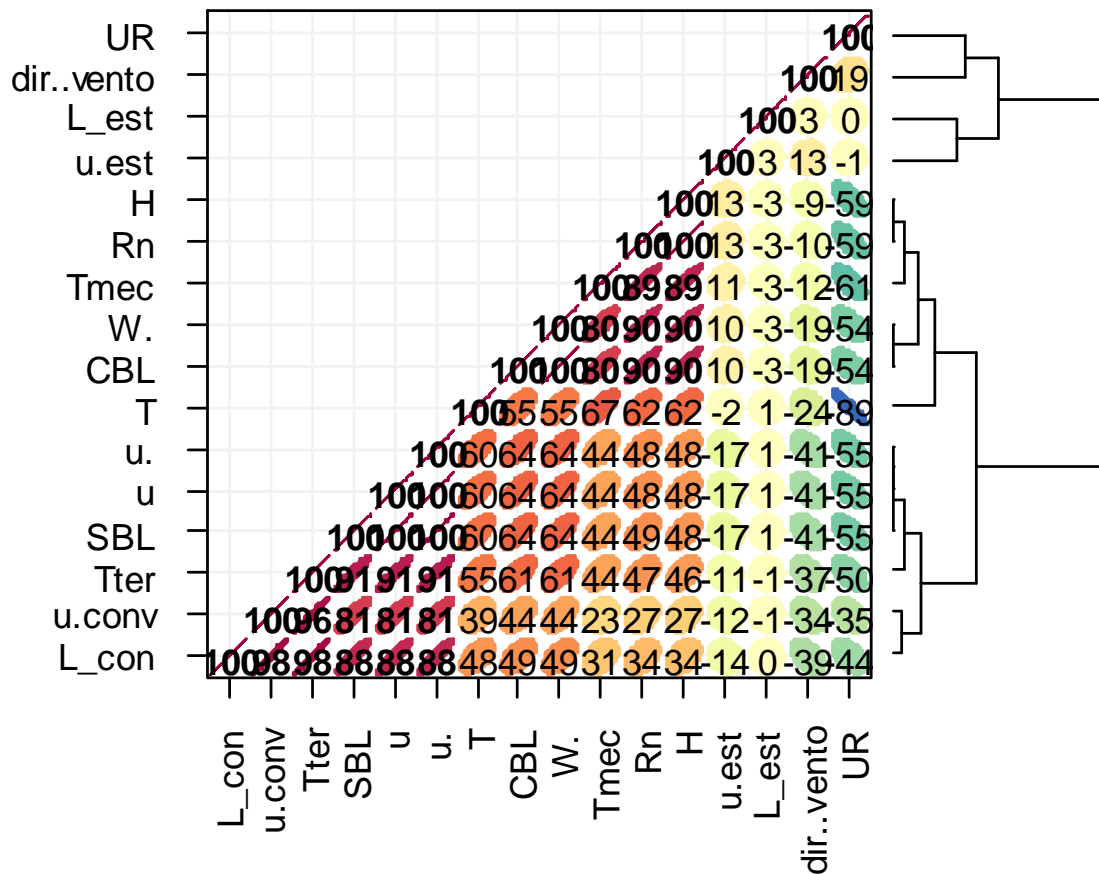
Como forma de averiguar a correlação existente entre os parâmetros micrometeorológicos, realizou-se o cálculo da correlação de Pearson juntamente com o dendograma de cluster para cada região analisada. Os dados tratados nessa seção compõem os dados de entrada (.spc) e (.pfl), que serão posteriormente utilizados no cálculo das plumas pelo AERMOD. As Figuras 13 a 15 apresentam as correlações em porcentagem, juntamente com os dendogramas.

Figura 13- Gráfico de Correlação de Pearson e dendograma de similaridade pelo método de Ward e Single Linkage entre as variáveis u*(camada de mistura e estável), CBL, SBL, u, T_{mec}, T_{term}, W*, UR, direção do vento, H, Rn, T e L (camada de mistura e estável) para Belo Horizonte.



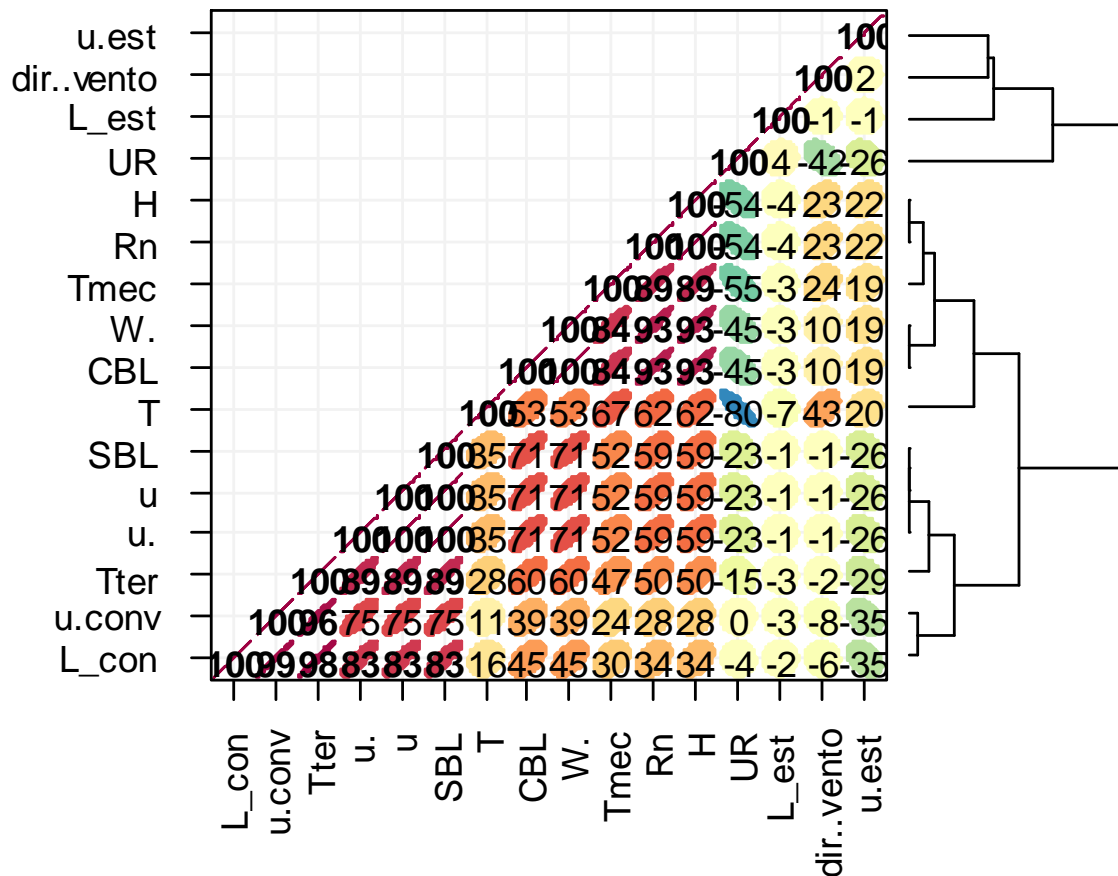
Fonte: Do Autor.

Figura 14- Correlação de Pearson e dendograma de similaridade pelo método de Ward e Single Linkage entre as variáveis u*(camada de mistura e estável), CBL, SBL, u, Tmec, Tterm, W*, UR, direção do vento, H, Rn, T e L (camada de mistura e estável) para Betim.



Fonte: Do Autor.

Figura 15- Correlação de Pearson e dendograma de similaridade pelo método de Ward e *Single Linkage* entre as variáveis u*(camada de mistura e estável), CBL, SBL, u, Tmec, Tterm, W*, UR, direção do vento, H, Rn, T e L (camada de mistura e estável) para Contagem.



Fonte: Do Autor.

Ao analisar as Figuras 13 a 15, verificou-se que em todos os municípios, as variáveis foram agrupadas de maneira semelhante, obtendo três grandes clusters. Destacam-se dois grupos que estão diretamente relacionados aos fenômenos de turbulência mecânica (u, u* da camada estável e instável, SBL e CBL) e térmica (T, Rn, H, W*). Nota-se que a SBL, em um dos agrupamentos, está diretamente correlacionada com a velocidade de fricção (valores chegam a 99%), pois além dos gradientes vertical de temperatura (dT/dZ), que geram forças de empuxo, juntamente com a velocidade média do escoamento do ar (u), o u^* é responsável por suprir energia para manter o

movimento turbulento na camada estável, sendo essa, turbulência mecânica. A velocidade de fricção torna-se o principal parâmetro para a caracterização da turbulência quando esta é dominada por tensão de cisalhamento.

Por outro lado, a CBL, além apresentar turbulência mecânica, há também o perfil oriundo da turbulência térmica. A turbulência térmica ou convectiva em sua parametrização está em função da temperatura (T), da radiação solar global absorvida pelo ar (R_n) e do fluxo de calor da superfície da Terra aquecida pelo sol (H). A correlação da CBL entre a turbulência térmica varia de 44 a 62%. Esses valores podem ser justificados pela superestimação dos valores de turbulência mecânica de Benkley e Schulman (1979) que alcançam valores maiores que a térmica inclusive durante o período diurno em alguns casos, ocasionando em valores de 99% de correlação.

Em microescala meteorológica, a velocidade e a direção do vento são essenciais no transporte de poluentes e turbulência atmosférica. Todavia, são influenciados por fatores topográficos, como obstáculos, cobertura vegetal e rugosidade de superfícies, o que não foi tratado nesse estudo. Dessa maneira, conforme os gráficos, observa-se que esses parâmetros estão basicamente relacionados a outras variáveis que dependem de suas intensidades.

5.3 Modelagem da Concentração de Material Particulado na RMBH

A simulação do AERMOD não convergiu em uma solução para os dados de concentração do receptor Contagem, estritamente para médias de 24h. Esse fato pode estar atrelado ao maior número de falhas nos campos meteorológicos, e da parametrização das CBL e SBL que difereriram nessa região conforme discutido na secção 4.1. Desse modo, realizaram-se simulações para obter a média das concentrações máximas utilizando o período de 1h para os três receptores e assim ajustou-se uma regressão linear entre as concentrações de 1h e de 24h de Betim e Belo Horizonte para cada coordenada polar em todas as distancias analisadas. A equação da reta média está descrita a seguir:

$$y = 0,061x + 13,442 \quad R^2 = 0,7405$$

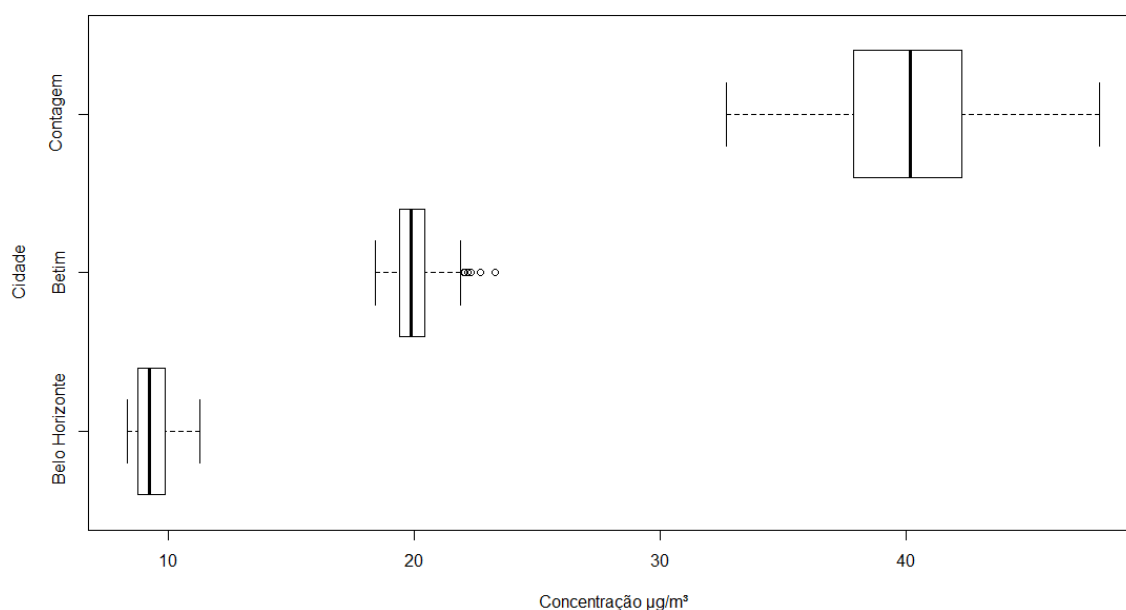
Em que,

x = média da máximas concentrações para 1h ($\mu\text{g m}^{-3}$)

y = média das concentrações para 24h ($\mu\text{g m}^{-3}$)

Dessa maneira, as concentrações de Contagem para as médias de 24h foram estimados a partir da regressão linear para cada ponto simulado (10° em 10°). Os resultados das concentrações médias diárias ($\mu\text{g m}^{-3}$) resultantes da simulação do modelo AERMOD para Belo Horizonte, Betim e Contagem estão apresentados Figura 16. Para melhor visualização da dispersão para cada cidade, os dados são apresentados com intervalo de confiança de 95%.

Figura 16- Boxplot de concentrações de MP_{10} em $\mu\text{g m}^{-3}$



Fonte: Do Autor.

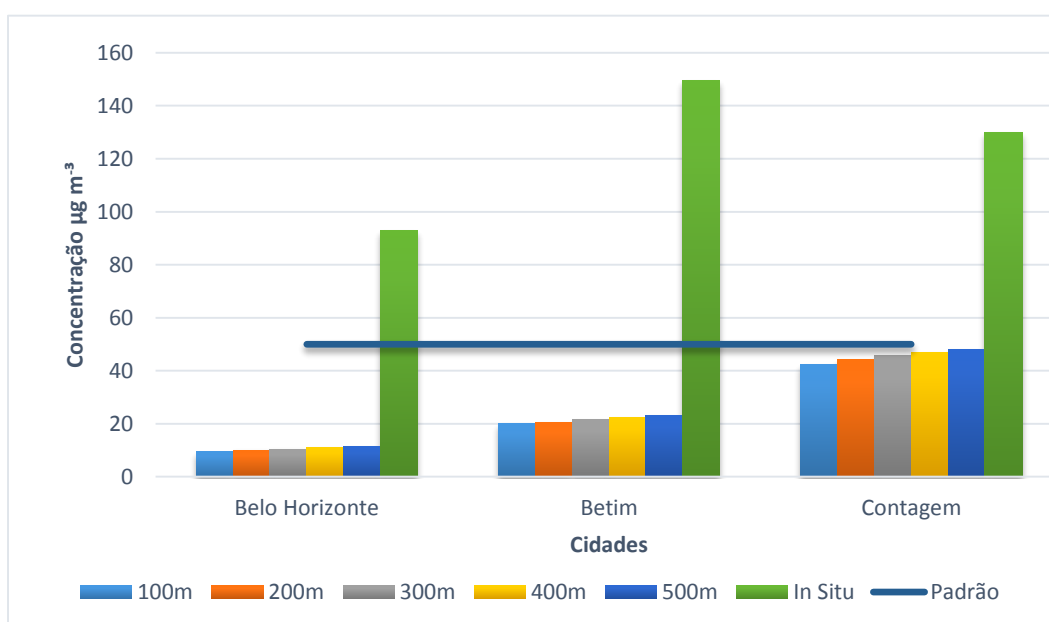
Ao analisar a Figura 16, percebe-se que há variabilidade entre as regiões. Esse fato pode ser justificado pela quantidade de fontes emissoras próximas aos receptores, juntamente com parâmetros meteorológicos favoráveis à dispersão. Betim e Contagem possuem maior número de fontes fixas e maiores taxas de emissão, logo apresentaram maiores concentrações. A máxima taxa de emissão verificada no inventário de 2003 foi

em Betim (6.27 g s^{-1}), seguida por Contagem (4.56 g s^{-1}) e Belo Horizonte (1.11 g s^{-1}). Contagem se sobressaiu provavelmente devido as condições meteorológicas, uma vez que dentre as três cidades, foi a que apresentou CBL e SBL mais baixas, promovendo efeitos deletérios na dispersão dos poluentes mais perceptíveis a superfície.

Belo Horizonte e Betim apresentam a mediana mais próxima do primeiro quartil (Q1), ou seja, os dados são positivamente assimétricos; enquanto que, Contagem apresenta uma distribuição mais simétrica, pois a mediana se encontra próxima ao centro do retângulo (Figura 16). Betim foi a única cidade a apresentar pontos discrepantes acima do limite superior (*outliers*).

Com a finalidade de avaliar a qualidade do ar da RMBH, os resultados obtidos na simulação da dispersão de material particulado utilizando o modelo AERMOD, foram comparados com os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA 491/2018. O valor limite estipulado pela legislação ambiental para o período de 24 horas, considerando o padrão final como referência, foi de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (Figura 17).

Figura 17- Concentrações máximas das distancias de 100, 200, 300, 400, 500 m e *in situ* em comparação com a resolução CONAMA 491/2018



Fonte: Do Autor.

Em todas as distâncias simuladas, nenhuma concentração máxima ultrapassou o limite estabelecido pela legislação. Mas, ressalta-se que os valores encontrados para Contagem estão próximos ao limite, obtendo maior valor de todos para a distância de 500 m ($47.85\mu\text{m}^{-3}$). Nota-se que em todos os receptores, as maiores concentrações foram encontradas para a distância de 500m, indicando que as regiões mais próximas ao centro das cidades são menos afetadas pelas indústrias. Por outro lado, averigua-se que as máximas concentrações obtidas in situ pelas estações meteorológicas ultrapassaram o padrão legislado, alcançando o maior índice em Betim ($149.45\mu\text{m}^{-3}$). Esses valores podem ser justificados pela influência de fontes móveis (não utilizadas no estudo), cujas concentrações são acrescidas no monitoramento. Além dos demais fatores meteorológicos, a ausência de precipitação no período em questão pode ter influenciado na remoção de partículas da atmosfera, impedindo o processo de deposição úmida.

Os resultados referentes às contribuições das fontes industriais nas concentrações médias diárias ($\mu\text{g m}^{-3}$) estão descritas nas Tabela 5.

Tabela 5- Concentrações ($\mu\text{g m}^{-3}$) simuladas pelo modelo AERMOD para as distâncias de 100, 200, 300, 400, 500 m.

Belo Horizonte						
	<i>In Situ</i>	100m	200m	300m	400m	500m
Média	20,39	9,23	9,29	9,38	9,47	9,56
%	100	45,2	45,6	46,0	46,4	46,9
Máximo	92,99	9,63	10,05	10,47	10,89	11,30
Mínimo	0,1	8,83	8,70	8,58	8,46	8,35
Betim						
	<i>In Situ</i>	100m	200m	300m	400m	500m
Média	46,91	19,87	19,88	19,92	19,84	19,61
%	100	42,4	42,4	42,5	42,3	41,8
Máximo	149,45	20,17	20,56	21,37	22,31	23,29
Mínimo	3,22	19,65	19,40	19,12	18,81	18,43
Contagem						
	<i>In Situ</i>	100m	200m	300m	400m	500m
Média	42,81	39,48	40,34	40,25	39,95	40,57
%	100	92,2	94,2	94,0	93,3	94,8
Máximo	130,00	42,41	44,25	45,55	46,82	47,85
Mínimo	14,00	36,12	34,96	34,65	33,26	32,67

Fonte: Do Autor.

As concentrações médias diárias para cada período simulado evidenciaram o comportamento dos resultados simulados e observados. Nota-se que os resultados das concentrações estimadas referem-se apenas a contribuição de emissão de MP₁₀ por fontes fixas. Dessa maneira, a partir dos valores das concentrações *in situ* infere-se a contribuição de material particulado emitido por fontes industriais corresponderam de 45 a 47% para Belo Horizonte e de 42% para Betim. Os valores obtidos para Contagem variaram de 92 a 95% do total observado, cabe ressaltar que as contribuições pode estar superestimadas, uma vez que derivam das regressões lineares do outros pontos receptores.

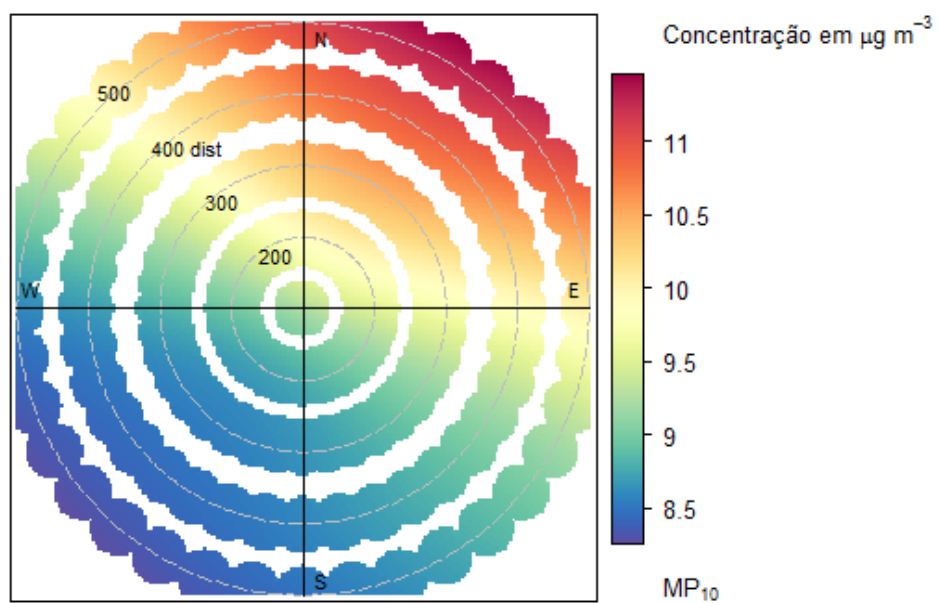
Pode-se evidenciar que as maiores concentrações de material particulado são esperadas para esse período visto que, a atmosfera se encontra com os padrões de comportamento mais estáveis não admitindo a dispersão dos poluentes de forma dinâmica. Esse fato se difere quando a atmosfera apresenta um condicionamento instável decorrente de temperaturas mais altas as quais influenciam diretamente na turbulência da camada de mistura, típico do período de verão.

A diferença das concentrações *in situ* e as estimadas também está relacionado as condições do terreno, pois no AERMOD utilizou-se topografia simples, a topografia complexa influencia a trajetória e a difusão da pluma dos poluentes. Embora ocorram altas concentrações de poluentes em terreno complexo, muitos processos físicos agem no sentido de reduzir as concentrações, como por exemplo os vórtices que são formados pelo ar que encontra obstáculos em seu caminho (HANNA et al, 1982).

5.4 Modelagem Espacial das Concentrações de Material Particulado na RMBH

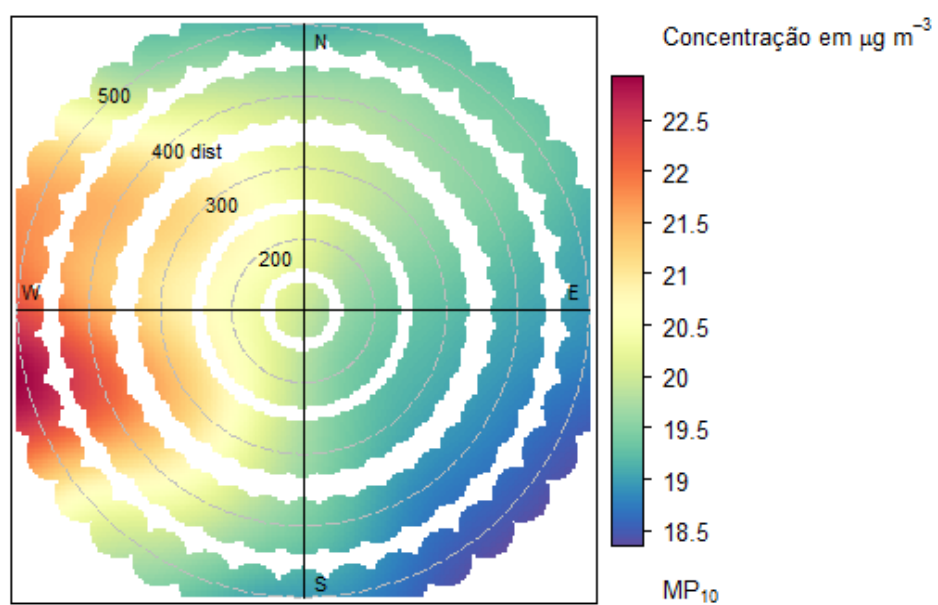
A fim de analisar o perfil espacial das concentrações, elaboraram-se figuras com as coordenadas polares e suas respectivas concentrações adquiridas após a simulação do AERMOD (Figuras 18 a 20).

Figura 18- Perfil espacial das concentrações para o centro de Belo Horizonte



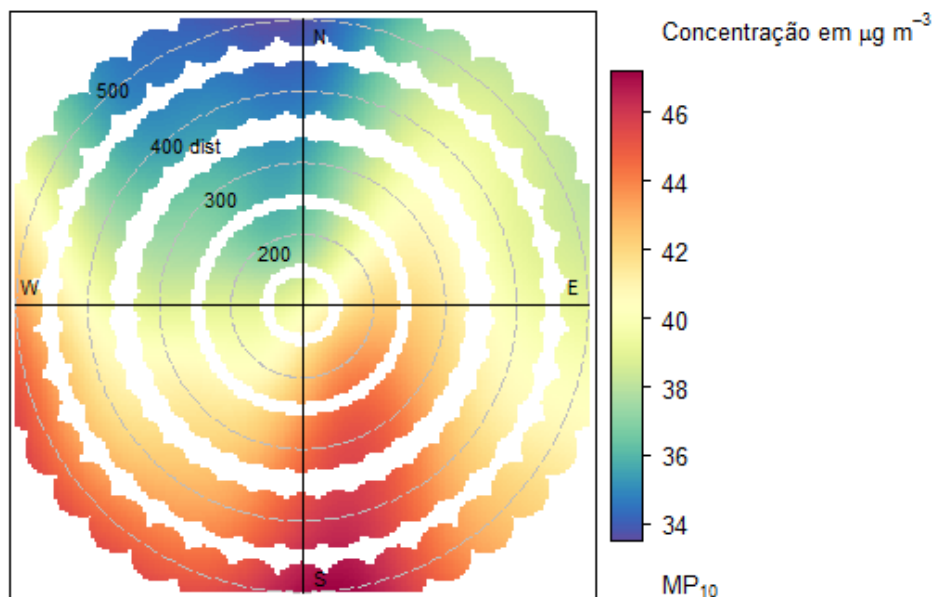
Fonte: Do Autor.

Figura 19- Perfil espacial das concentrações para o centro de Betim



Fonte: Do Autor.

Figura 20- Perfil espacial das concentrações para o centro de Contagem



Fonte: Do Autor.

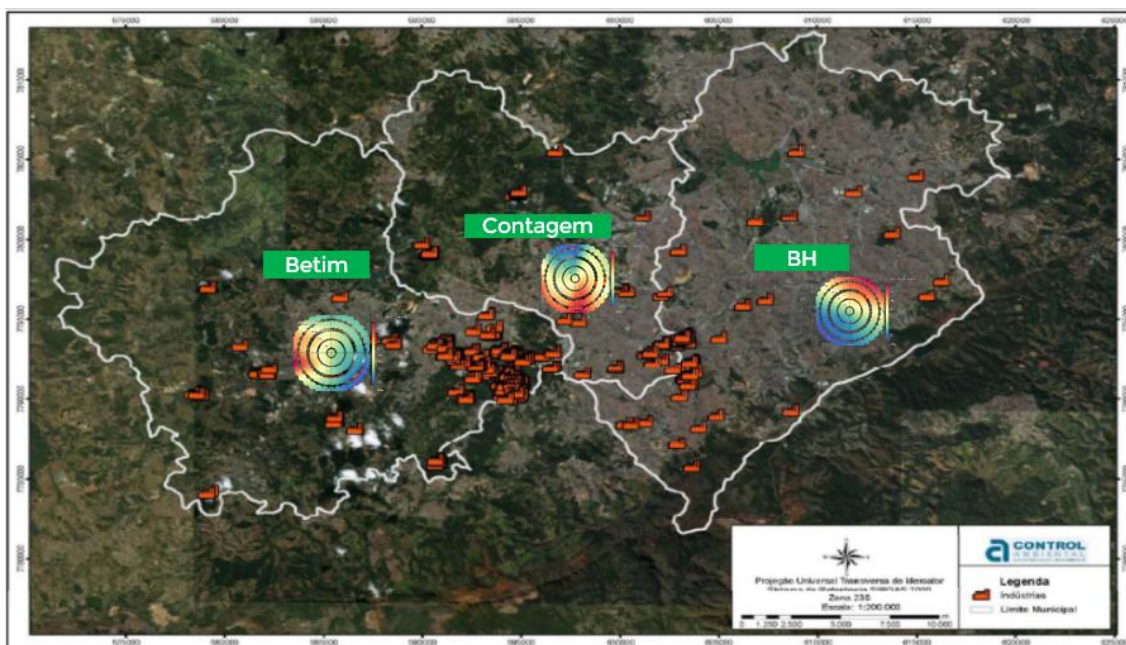
Verifica-se que as maiores concentrações de material particulado se encontram na direção nordeste para o centro de Belo Horizonte, oeste-sudoeste para Betim e em uma faixa que varia da direção sudoeste a sudeste em Contagem, porém se intensificando mais a direção sul.

Analisando o mapa de distribuição das fontes de emissão da RMBH encontrado no inventário de 2015, o qual a quantidade de indústrias inventariadas para o ano base 2003 aumentou em 36,7%, (Figura 20), constatou-se que a região com maior densidade industrial de Contagem está localizada na região sul da cidade. Além disso, o maior número de indústrias de Betim e de Belo Horizonte se encontra próximo ao limite municipal sul de Contagem, fato que associado às condições meteorológicas e a baixa altitude da camada de mistura da região, pode interferir e promover altas concentrações nessa direção também. Entretanto, para a região de Betim, a direção de maiores concentrações se encontram opostas às direções de maior densidade industrial, inferindo

que um número menor de indústrias são responsáveis pelos maiores cargas de material particulado simulado.

Em Belo Horizonte, verificou-se, dentre as localidades analisadas, as menores concentrações e ao analisar o mapa de distribuição industrial, percebe-se, excluindo os empreendimentos próximos a Contagem, que a relação de empresas é mais difusa que as demais cidades, sendo as máximas concentrações estimadas representadas pela região nordeste que apresenta um pequeno grupo de fontes fixas. Também pode ser explicado pela maior altitude da camada de mistura encontrada na região, fato que pode ter permitido melhor dispersão dos poluentes.

Figura 21- Distribuição geográfica das indústrias localizadas na RMBH



Fonte: Adaptado de FEAM (2018).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a adequação do código fonte para dados meteorológicos no Brasil, obteve resultados satisfatórios para as cidades de Betim e Belo Horizonte. A estação

meteorológica de Contagem não apresentou alguns dados *in situ*, motivo pelo qual o modelo não convergiu para as médias de 24h, sendo necessário utilizar a regressão $y=0,061x-13,442$, ajustada a partir dos resultados de Belo Horizonte e Betim.

Averiguou-se que as maiores alturas da camada de mistura são encontrada em Belo Horizonte atingindo valores próximos a 1200 m de altura, Betim apresentou valores intermediários e a cidade de Contagem, as menores alturas analisadas, obtendo valores próximos a 900 m. Esse fato pode ter dificultado os processos de dispersão atmosférica em Contagem, uma vez que as concentrações atingiram máximas de $47,85 \mu\text{g m}^{-3}$, enquanto que Belo Horizonte e Betim alcançaram resultados máximos de $11,30 \mu\text{g m}^{-3}$ e $23,29 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

Após a simulação no AERMOD, verificou-se que a contribuição de MP_{10} emitido por fontes fixas industriais correspondem em até 47% para Belo Horizonte, de 42% para Betim, e até 95% para Contagem em relação ao monitoramento *in situ*.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREÃO, W. L.; GALVÃO, E. S.; FERONI, R. C. **Avaliação da representatividade do parâmetro de dispersão vertical no cálculo da concentração de um contaminante integrada lateralmente**. Blucher Physics Proceedings, v. 3, n. 1, p. 90-94, 2016.

ARBEX, M. A. **A Poluição do ar e o Sistema Respiratório**. Jornal Brasileiro de Pneumologia, São Paulo, v. 38, n. 5, p. 643-655, set-out, 2012.

ARMSTRONG, M. P.; COWLES, M. K.; WANG, S. **Using a computational grid for geographic information analysis: A reconnaissance**. The Professional Geographer, Malden, v. 57, n. 3, p. 365-375, aug, 2005.

ARYA, S. P. S. **Introduction to micrometeorology**. San Diego, CA: AcademicPress, 1988, 307 p

BARCELLOS, F. C.; MORENO, R. A.; SILVA, L. C. D.; SILVA, L. A. **Poluição do ar por fontes fixas nos municípios brasileiros**. In: Encontro da sociedade brasileira de economia ecológica, VI, 2005, Brasília (DF), Anais... Brasília (DF): SBEE, 2005

BENKLEY, C W.; SCHULMAN, L L. **Estimating hourly mixing depths from historical meteorological data.** Journal of Applied Meteorology, v. 18, n. 6, p. 772-780, 1979.

BOWEN, I. S. **The ratio of heat losses by conductions and by evaporation from any water surface.** Physical Review Serial 2, New York, v. 27, p. 779-787, 1926.

BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental: O Desafio do desenvolvimento Sustentável.** 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRUTSAERT, W., **Heat and mass transfer to and from surfaces with dense vegetation or similar permeable roughness, Boundary-Layer Meteorology.** v.16, p. 365-388, 1979.

BURDORF, A. **Characterization of population exposure to organochlorines : a cluster analysis application.** v. 16, n. 2, p. 231–239, 2013

CAPUTO, M.; GIMENEZ, M.; SCHLAMP, M. **Intercomparison of atmospheric dispersion models.** Atmospheric Environment, v. 37, n. 18, p. 2435-2449, 2003.

CARSLAW, D C.; ROPKINS, K. **Openair - An r package for air quality data analysis. In: Environmental modelling & software, Vol. 27-28, p. 52-61, 01.2012.**

CETESB. **Série relatórios. Qualidade do ar no estado de São Paulo.** 2011. 120 p.

CIMORELLI, A.J. et al **AERMOD description of model formulation.** EPA-454/R-03-004. 2004.

CUNHA, R. M.P. **Estudo do Transporte de Poluentes na Região do Pólo Petroquímico, Localizado Em Triúnfo- Rs.** 2002.

DA SILVA, R; DE MORAES, O L L. **Características espectrais e similaridade da camada limite superficial sobre terreno complexo.** Ciência e Natura, p. 45-61, 2000.

EPA (Environmental Protection Agency) (2004). **The particle pollution report: Current understanding of air quality and emissions through 2003.** EPA 454-R-04-002, December 2004.

EPA. **Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions.** North Carolina, U.S. Environmental Protection Agency. Federal Register / Vol. 70, No. 216 / Rules and Regulations. Appendix W of 40 CFR Part 51. 2005

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos, estudo de dispersão atmosférica e projeto da rede otimizada de monitoramento atmosférico para a Região Metropolitana de**

Belo Horizonte, eixo Belo Horizonte - Contagem - Betim. Belo Horizonte: FEAM, 2003.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Relatório Técnico: Atualização do Inventário de fontes de emissão de poluentes atmosféricos da região de Belo Horizonte, Contagem e Betim.** Belo Horizonte: FEAM, 2018.

FERNANDES, J S. **Poluição atmosférica e efeitos respiratórios, cardiovasculares e reprodutivos na saúde humana.** Rev Med Minas Gerais, v. 20, n. 1, p. 92-101, 2010.

FISCHER, H. **Mixing in inland and coastal waters.** 1 ed. San Diego: Academic Press, 1979.

FREITAS, C U de . **Poluição do ar em cidades brasileiras: selecionando indicadores de impacto na saúde para fins de vigilância.** Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília , v. 22, n. 3, p. 445-454, sept. 2013 .

GUARIEIRO, L LN; VASCONCELLOS, P C.; SOLCI, M C. **Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão.** Revista Virtual de Química, v. 3, n. 5, p. 434-445, 2011.

GERAVANDI, S, GOUDARZI, G, BABAEI, AA, MOHAMMADI, JM, NIRI, MV, SALMANZADEH, S, SHIRBEIGI E (2015) **Health endpoint attributed to sulfur dioxide air pollutants.** Jundishapur J. Health Sci. 7(3): e29377.

HANNA, S.R. et al **Evaluation of the ADMS, AERMOD and ISC3 dispersion models with de Optex, Duke, Forest, Kinkaid, Indianapolis and Lovett Field data sets.** International Journal of Environment and Pollution, v. 16, n. 1-6, p. 301-314, 2001.

HOINASKI, L. **Parametrização de Coeficientes de Dispersão Lateral em Modelos de Qualidade do Ar para Previsões em Tempos de Média Curtos.** 2015. 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativa população de Belo Horizonte 2018.** Vamos conhecer o Brasil, nosso povo, características da população. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-povo/caracteristicas-da-populacao.html>> Acesso em: mai 2019.

INMET. **Dados meteorológicos da Estação Meteorológica de Belo Horizonte** Disponível em: <www.inmet.gov.br> Acesso em: mai 2019.

KEMP, D. D. **Global environmental issues: A climatological approach.** 2 ed. U. S. Routledge, 1994.

LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE. AERMET/AERMOD. **Surface & Upper Air Met Data Preprocessed from MM5 Data**. Gaussian Plume Air Dispersion Model. Junho. 2014

LEIVAS, J F; TEIXEIRA, AH de C.; ANDRADE, R G. **Agrometeorologia**. Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE), 2014.

LOECK, J F. **Efeitos estocásticos em modelos determinísticos para dispersão de poluentes na camada limite atmosférica**. 2014.

LOUREIRO L. N.; **Panorâmica Sobre Emissões Atmosféricas Estudo De Caso: Avaliação Do Inventário Emissões Atmosféricas da Região Metropolitana Do Rio De Janeiro Para Fontes Móveis**. Tese Universidade federal do Rio de Janeiro, 2005

MARQUES FILHO, E P. **Investigação da Camada Limite Planetária convectiva com modelo LES aplicado à dispersão de poluentes**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARTINS, E M; FORTES, J D N; DE ARAÚJO LESSA, R. **Modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos: avaliação de modelos de dispersão de poluentes emitidos por veículos**. Revista Internacional de Ciências, v. 5, n. 1, p. 2-19, 2015.

MELO, A.M.V.; SANTOS, J.M.; MAVROIDIS, I.; REIS JR, N.C. (2012) **Modelling of odour dispersion around a pig farm building complex using AERMOD and CALPUFF**. Comparison with wind tunnel results. Building and Environment, v. 56, p. 8-20.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Evolução da regulamentação de emissões atmosféricas de poluentes no Brasil, 2018**. Disponível em <<https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cmads/audiencias-publicas/audiencia-publica-2014/3-4-2013-poluicao-atmosferica-nas-grandes-cidades/apresentacoes/rudolf-de-noronha/view>>.

MIRAGLIA, S. G. E. K.; GOUVEIA, N. **Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras**. Ciência & Saúde Coletiva, São Paulo, v. 19, n. 10, p. 4141-4147, 2014.

MIRANDA E BAPTISTA. **A Poluição Do Ar Na Cidade de Goiânia-Go e a Prática de Exercícios Físicos-EFR** Vol. 2, No 3, 2008.

MORAES, O. L. L.; FITZRRALD, D. R.; ACEVEDO, O. C.; SAKAI, R. K.; CZIKOWSKY, M. J.; DEGRAZIA, G. A. **Comparing spectra and cospectra of turbulence over different surface boundary conditions**. Physica A, 387, 4927–4939, 2008.

MORAES O. L. L. de. **Meteorologia e Poluição Atmosférica: Teoria, Experimentos e Simulação**. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2010.

MORAES, M.R. **Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na microescala atmosférica**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. 143p, 2004.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T. **Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: Um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental**. Ambiente e Sociedade, Campinas, v. 17, n. 2, p. 159-173, jul-dez, 2004.

MOREIRA O. C. L.; **Comparação Entre Os Poluentes Atmosféricos E Ruídos Emitidos Por Uma Caldeira Flamotubular Movida A Gás Natural E A Óleo Combustível Bpf 2ª**. Dissertação Universidade Federal do Mato Grosso de Sul, 2007.

MOTA, S. **Impactos ambientais das atividades humanas. Introdução à engenharia ambiental**. 2.ed. Rio de Janeiro: ABES, 2000.

PCPV (2005) **Plano de Controle da Poluição por Veículos em Uso**. Governo Do Estado Do Ceará.

RAMOS, A. P. et al **O uso da modelagem para predizer a dispersão de nuvens poluentes na atmosfera**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 9006-9012, 2015.

RODRIGUES, J. P. **Modelagem Matemática da Dispersão de Poluentes Atmosféricos como Etapa de Pré-Seleção de Locais para Instalação de Estações de Monitoramento da Qualidade do Ar em Paranaguá-PR**. 2016. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ROSA, A F M. **Modelagem da Concentração de Dióxido de Enxofre na Região de Candiota RS utilizando o modelo AERMOD**. 2012.

ROSEIRO, M N V; TAKAYANAGUI, A M M. **Controle da Qualidade do Ar no Brasil e no Estado de São Paulo: Aspectos Legais**. Revista Hispeci & Lema Bebedouro, v. 8, p. 50-53, 2005.

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

SCHLINK, U. et al **Air dispersion modeling workshop: Course Notes**, 2006.

SOCOLOFSKY, S. A.; JIRKA G. H. **Special topics in mixing and transport process in the environment**. 5 ed. Texas: Texas A&M University, 2005.

STULL, R. B. **Static Stability – An Update**. Bulletin American Meteorological Society, v. 72, p.1521-1529, 1991.

TADANO, Y S.; MAZZA, R A.; TOMAZ, E. **Modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos no município de Paulínia (Brasil) empregando o ISCST3**. Assoc. Arg. Mec. Comp, p. 8125-8148, 2010.

TUNDO P. e ZECCHINI F. **Mudanças climáticas globais** . Publicado em Julho de 2007 pelo Consórcio Inter-Universitário Nacional “A Química para o Ambiente” e IUPAC União Internacional de Química Pura e Aplicada Disponível em:

VESILIND, P. A; MORGAN, S M. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, v. 2, 2011.

VIEIRA FILHO, M. V. S. **Avaliação dos efeitos locais na composição química de águas de chuva nas cidades de São Paulo e Cubatão**. 2011. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas)-Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

VICTORIA, E. P. A. **Construction of input meteorological data files for EPA Victoria's regulatory air pollution model (AERMOD)**. [Online] Available at: <http://www.epa.vic.gov.au/~media/Publications/1550.pdf>, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Quality Guidelines - Global Update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Copenhagen, Denmark, 2006. Disponível em: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf Acesso em: mai, 2019.

ZANNETTI, P. **Air Pollution Modelling**. Southampton - UK: Comp. Mech. Publications, 1990. 500 p.