

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

VÍCTOR CÉSAR DE SOUZA LIMA

O MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL EM CENTROS URBANOS: uma pesquisa
exploratória quanto as suas classificações, mecanismos atmosféricos de dispersão e seus
impactos socioambientais

JUIZ DE FORA

2022

VÍCTOR CÉSAR DE SOUZA LIMA

O MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL EM CENTROS URBANOS: uma pesquisa
exploratória quanto as suas classificações, mecanismos atmosféricos de dispersão e seus
impactos socioambientais

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao curso de geografia, da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Cássia de Castro
Martins Ferreira.

JUIZ DE FORA

2022

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lima, Víctor César de Souza.

O MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL EM CENTROS URBANOS : uma pesquisa exploratória quanto as suas classificações, mecanismos atmosféricos de dispersão e seus impactos socioambientais / Víctor César de Souza Lima. -- 2022.
73 p. : il.

Orientadora: Cássia de Castro Martins Ferreira
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Humanas, 2022.

1. Meio ambiente. 2. Atmosfera. 3. Poluição. 4. Qualidade do ar.
5. MP10. I. Ferreira, Cássia de Castro Martins, orient. II. Título.

VÍCTOR CÉSAR DE SOUZA LIMA

O MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL EM CENTROS URBANOS: uma pesquisa exploratória quanto as suas classificações, mecanismos atmosféricos de dispersão e seus impactos socioambientais

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao curso de geografia, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Data: ___/___/_____ Nota ou conceito: ___

APROVADO () REPROVADO ()

Banca Examinadora

Profª. Dra. Cássia de Castro Martins Ferreira
Orientadora – Departamento de Geociências - UFJF

Prof. Dr. Fábio de Oliveira Sanches
Departamento de Geociências - UFJF

Me. Yan Carlos Gomes Vianna
Departamento de Geociências - UFJF

Dedico este trabalho à minha mãe, Haydée, e ao meu pai, Fernando. Assim como a todos os profissionais da educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por possibilitarem chegar até aqui, contribuindo diversas vezes na construção do meu conhecimento acadêmico e na minha educação, viabilizando a elaboração de um raciocínio crítico e a busca constante pela aprendizagem nas suas mais diversas formas. Em especial a minha mãe, Haydée, por acreditar sempre em mim, mesmo nos momentos de maior turbulência e que pareciam em que não haveria como continuar a jornada.

Agradeço à minha orientadora Cássia, por me acolher e me auxiliar no processo como um todo ao longo do curso, inclusive apresentando a temática de climatologia e assuntos correlatos pelo qual desenvolveu meu interesse pela temática. Adicionalmente, pela compreensão, acolhida e disponibilidade sempre mostradas ao longo do meu percurso acadêmico.

Aos professores que me deparei ao longo da jornada do curso de Geografia, tal e qual aos que cruzaram meu percurso educacional, por possibilitarem a agregação do meu conhecimento e visão de mundo, sendo que executam uma ação de suma importância, principalmente em momentos tão sombrios, sob os quais nos encontramos, onde muitas vezes são desvalorizados.

A UFJF, por estar me propiciando um ambiente de aprendizagem de qualidade ao longo de vários anos e ao LabCAA por ter me ofertado um âmbito propício ao desenvolvimento de conteúdos na área de clima.

Por fim, a todos os amigos, colegas e demais familiares que contribuíram nas suas diversas formas e na medida do possível para eu chegar até aqui, em especial ao Guilherme Goretti, que cooperou na construção de parte do conhecimento acadêmico sempre que necessário.

“Não é possível convencer um crente de coisa alguma, pois suas crenças não se baseiam em evidências; baseiam-se numa profunda necessidade de acreditar. ”

(Carl Sagan)

“A degradação Ambiental representa nada mais do que o reflexo externo das carências da alma humana. ”

(Lyton Caldwell e Karen S. Shrader-Frechette)

RESUMO

Existe uma preocupação crescente nos últimos anos relacionada a problemática da sustentabilidade e a preservação ambiental e dos seus meios, tornando-se um assunto presente nas esferas industriais, governamentais e sociais. Esta realidade, contudo, é incipiente e ganhou força a partir de três eventos que ocorreram em 1968: Clube de Roma, a 45ª seção do Conselho Econômico e Social das Nações Unidas e a Conferência da Biosfera. Logo, o modelo de desenvolvimento econômico vigente, pautado no consumismo desenfreado, na obsolescência programada e na queima de combustíveis fósseis, como matriz energética e fonte de matéria prima, são incompatíveis com a manutenção do equilíbrio ecológico terrestre e a sobrevivência da espécie humana. A atmosfera, como resultado deste processo, se apresenta cada vez mais degradada, poluída e contaminada, com o agravante que a maior parcela da população mundial reside em centros urbanos, locais estes que concentram as atividades antrópicas e seus impactos negativos. Mediante tal quadro, o enfoque da pesquisa será direcionado ao poluente Material Particulado, em especial a parcela denominada Inalável, visto sua alta complexidade química e física, degradando a saúde da população, dos animais e a vegetação, além de deteriorar o espaço urbano. Este estudo objetiva reconhecer e descrever, através de uma pesquisa exploratória bibliográfica, as características, classes, mecanismos de emissão e deposição deste elemento. Aborda-se também, como os fatores meteorológicos interagem com este a fim de dispersá-lo e removê-lo. Utiliza-se, como fonte de informação: livros, artigos científicos, trabalhos acadêmicos, legislações, diretrizes, apostilas da Fundação Getúlio Vargas e sites de órgãos governamentais e de entidades ambientais, a maioria sendo obtida eletronicamente. Destaca-se o uso das ferramentas virtuais, como: Biblioteca Eletrônica SciELO, Google Acadêmico e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. Para isso, fez-se uma fundamentação teórica pautada na abordagem sobre conhecimentos da atmosfera, Camada Limite Atmosférica, principais poluentes do ar e padrão de qualidade do ar, para adentrar no tópico de Material Particulado e suas possíveis classificações, impactos e a influência dos elementos meteorológicos. Por fim, aborda-se a legislação nacional e as diretrizes internacionais sobre o tema. Conclui-se que quanto mais favoráveis as condições que propiciem a estabilidade atmosférica, maior será a concentração do mesmo, nos quais os recursos naturais, a biota e as populações estarão expostos, consistindo tais momentos de especial caráter agressivo as pessoas mais sensíveis. Fatores como vento e temperatura elevada, de forma geral, favorecem a movimentação do ar e sua mistura, viabilizando assim a dispersão e diluição do poluente, da mesma maneira que a

precipitação e a alta umidade relativa do ar permitem a deposição deste, na faixa temporal em que estiverem presentes. Quanto menos intensos esses processos atmosféricos, pior será a qualidade do ar no tocante a concentração de Material Particulado, inclusive nas zonas urbanas, proporcionando a ocorrência de episódios nos quais os mesmos se apresentarão acima dos valores adequados a saúde humana. Desta forma, a estação do ano de inverno, por apresentar essas características, principalmente em dias de ocorrência de inversão térmica, tende a ser a mais crítica.

Palavras-chave: meio ambiente; atmosfera; poluição; qualidade do ar; MP₁₀.

ABSTRACT

There is a growing concern in recent years related to the issue of sustainability and environmental preservation and its means, becoming a present issue in industrial, governmental and social spheres. This reality, however, is incipient and gained strength from three events that took place in 1968: Club of Rome, the 45th session of the United Nations Economic and Social Council and the Biosphere Conference. Therefore, the current economic development model, based on unbridled consumerism, programmed obsolescence and the burning of fossil fuels, as an energy matrix and source of raw material, are incompatible with the maintenance of terrestrial ecological balance and the survival of the human species. The atmosphere, as a result of this process, is increasingly degraded, polluted and contaminated, with the aggravating factor that most of the world's population resides in urban centers, places that concentrate human activities and their negative impacts. In this context, the focus of the research will be directed to the pollutant Particulate Material, especially the portion called Inhalable, given its high chemical and physical complexity, degrading the health of the population, animals and vegetation, in addition to deteriorating the urban space. This study aims to recognize and describe, through an exploratory bibliographic research, the characteristics, classes, emission and deposition mechanisms of this element. It is also discussed how the meteorological factors interact with it in order to disperse and remove it. As a source of information, books, scientific articles, academic works, legislation, guidelines, Fundação Getúlio Vargas handouts and websites of government agencies and environmental entities are used, most of which are obtained electronically. The use of virtual tools stands out, such as: SciELO Electronic Library, Google Scholar and the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations. For this, a theoretical foundation was made based on the approach on knowledge of the atmosphere, Atmospheric Boundary Layer, main air pollutants and air quality standard, to enter the topic of Particulate Material and its possible classifications, impacts and the influence of the elements meteorological. Finally, national legislation and international guidelines on the subject are discussed. It is concluded that the more favorable the conditions that provide atmospheric stability, the greater the concentration of the same, in which natural resources, biota and populations will be exposed, with such moments of special aggressive character consisting of the most sensitive people. Factors such as wind and high temperature, in general, favor the movement of air and its mixture, thus enabling the dispersion and dilution of the pollutant, in the same way that precipitation and high relative humidity allow its deposition, in the temporal range in which they are present. The less

intense these atmospheric processes, the worse the air quality will be in terms of the concentration of Particulate Material, including in urban areas, providing the occurrence of episodes in which it will be above adequate values for human health. In this way, the winter season, for presenting these characteristics, mainly in days of occurrence of thermal inversion, tends to be the most critical.

Key-words: environment; atmosphere; pollution; air quality; MP₁₀.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ESQUEMAS

Esquema 1 -	Possíveis processos envolvidos entre a emissão dos poluentes e o impacto nos receptores.....	40
-------------	--	----

FIGURAS

Figura 1 -	A atmosfera terrestre, suas camadas e variações de temperatura e pressão	29
Figura 2 -	Compartimentos da Camada Limite Atmosférica	33
Figura 3 -	Fontes fixas e moveis de Material Particulado de origem antrópica ..	47
Figura 4 -	Diferentes diâmetros de MP	50
Figura 5 -	Níveis de Deposição do MP de acordo com seu d_a	53
Figura 6 -	Mecanismos físicos de deposição do MP no sistema respiratório	53

FOTOS

Foto 1 -	Ocorrência de evento de <i>smog</i> fotoquímico na cidade de Xangai	57
----------	---	----

GRÁFICOS

Gráfico 1-	Tempo de permanência do MP na atmosfera em função do tamanho e suas modalidades de Remoção	61
------------	--	----

QUADROS

Quadro 1 -	Principais poluentes atmosféricos por classe de composição	35
------------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Art.	Artigo
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CDC	<i>Centers for Disease Control and Prevention</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLN	Camada Limite Noturna
CLP	Camada Limite Planetária
CLR	Camada Limite Residual
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRN	Camada Residual Noturna
DPOC	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
ECO-92	Conferências das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, de 1992
ECOSOC	Conselho Econômico e Social das Nações Unidas
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
FGV	Fundação Getúlio Vargas
HEI	<i>Health Effects Institute</i>
LabCAA	Laboratório de Climatologia e Análise Ambiental
MP	Material Particulado
MP _{0,002}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 0,002 micrômetro
MP _{0,1}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 0,1 micrômetro (Partículas Ultrafinas)
MP _{1,0}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 1,0 micrômetro
MP _{2,5}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 micrômetros (Moda Fina) (Partículas Respiráveis)

MP ₁₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 micrômetros (Material Particulado Inalável) (Partículas Inaláveis)
MP ₅₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 50 micrômetros
MP ₁₀₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 100 micrômetros
n.º	Número
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NRDC	<i>Natural Resources Defense Council</i>
NSW	<i>New South Wales</i>
OECD	<i>The Organization for Economic Co-operation and Development</i>
ONGs	Organizações Não Governamentais
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPM	Partes Por Milhão
PTS	Partículas Totais em Suspensão
SciElo	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SEMA	Secretaria Especial do Meio Ambiente
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
WHO	<i>World Health Organization</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
SO ₂	Dióxido de enxofre
d _a	Diâmetro aerodinâmico
µm	Micrômetro
≤	Menor ou igual a
%	Porcentagem
µg	Micrograma
m ³	Metro Cúbico
N ₂	Nitrogênio diatômico
O ₂	Oxigênio diatômico
Ar	Argônio
(OH*)	Radical hidroxila
(HO ₂ *)	Radical hidroperóxido
x	Vezes
kg	Quilograma
°C	Grau Celsius
km	Quilômetro
m	Metro
§	Parágrafo
CO	Monóxido de carbono
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₃	Ozônio
SO _x	Óxidos sulfúricos
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
Al	Alumínio
Si	Silício
Ca	Cálcio
Ti	Titânio
Fe	Ferro
SO ₄ ²⁻	Sulfato

NO^{3-}	Nitrato
NH_3	Amônia
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
\geq	Maior ou igual a
$<$	Menor que
$>$	Maior que
h	Hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO TEMA	16
1.2	OBJETIVO GERAL	22
1.2.1	Objetivos Específicos	23
1.3	JUSTIFICATIVA	23
2	METODOLOGIA	26
3	A ATMOSFERA TERRESTRE	28
3.1	A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	31
3.2	PRINCIPAIS POLUENTES E SEUS EFEITOS ADVERSOS	34
3.3	PADRÃO DE QUALIDADE DO AR	40
4	O MATERIAL PARTICULADO	42
4.1	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO	44
4.1.1	Quanto a Fonte Emissora	45
4.1.2	Quanto a Formação	45
4.1.3	Quanto a Origem	46
4.1.4	Quanto ao Tamanho	48
4.2	IMPACTOS AOS AGENTES RECEPTORES E A ECONOMIA	51
4.3	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS	58
4.3.1	Mecanismos de Deposição e Remoção	59
4.3.2	Chuva, Vento, Temperatura e Umidade Relativa Atmosférica	61
4.4	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E DIRETRIZES DA ONU	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Para se atingir ao que este trabalho é proposto, o mesmo está estruturado conforme se descreve na sequência. Inicia-se na seção primária um, com uma apresentação e delimitação do tema, sendo esta o elemento introdutório, buscando evidenciar o histórico, a nível global e nacional, da problemática ambiental e os principais eventos que promoveram uma mudança no sentido de sua degradação, assim como na conscientização e no aleta da crise eminente quanto à sua qualidade.

Inserir-se nesta conjuntura a temática da poluição atmosférica, apresentando o tópico de Material Particulado (MP) e sua importância. Identifica-se, adicionalmente, os objetivos gerais e específicos e a justificativa. A seção dois trata exclusivamente da metodologia, recursos e meios dispostos para a sua elaboração.

Na seção primária três, e nas que se desdobram desta, faz-se uma apresentação da atmosfera, seus principais elementos e mecanismos, e como ocorre a interação entre eles, a fim de explicitar a maneira em que se dá a interação com os poluentes. Na sequência, destaca-se os principais poluentes urbanos na degradação da qualidade do ar e usados universalmente para a sua aferição, citando seus efeitos adversos e impactos, e para tanto, definindo o último.

A seção primária quatro, e as suas subdivisões, abordam o universo do objeto de estudo, o definindo, categorizando e classificando mediante diversas variáveis, informando sobre seus impactos nas mais diversas esferas, além de sua relação com os fatores meteorológicos e influências sofridas por eles. No prosseguimento, expõe-se um quadro comparativo da legislação nacional quanto ao MP e as diretrizes recomendadas pela ONU (Organização das Nações Unidas). A última seção encerra a atividade através de uma revisão dos pontos abordados e das considerações finais.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO TEMA

Assuntos relacionados à sustentabilidade e a preservação ambiental tem-se tornado cada dia mais presentes em nossa realidade, assim como em todas as esferas que a permeiam, como nas indústrias, organizações não governamentais (ONGs), meios políticos e a sociedade como um todo. Contudo, essa realidade é incipiente, e tem ganhado força apenas ao longo das últimas décadas, pois acreditava-se que com os meios tecnológicos a disposição e em constante evolução, os recursos eram infindáveis. Este processo de maior conscientização e preocupação teve início de fato nos últimos 50 anos.

As primeiras informações documentadas de uma preocupação com relação ao meio ambiente, de fato, têm origem a mais tempo. Como exemplo, há registros referentes a 1560, na Alemanha, com a anotação de leis que buscavam o uso racional de florestas, de forma a se extrair respeitando um ritmo que possibilitasse ao próprio sistema se regenerar, sem inviabilizar posteriormente a extração. Observa-se que a preocupação se dava apenas devido a um interesse em atender às próprias necessidades de mercado (SANTOS; SKORA, 2020).

Com o advento da Revolução Industrial, que teve origem na Inglaterra no século XVIII e se expandiu ao longo dos anos para os demais países, resultou-se em um crescimento da classe burguesa e a ampliação e expansão das zonas urbanas, mediante a um crescente processo de mecanização da agricultura, que substituiu em grande parte a mão de obra. Esta, por sua vez, tendo retirada sua fonte de renda e em busca de melhores condições de vida, emigram para os centros urbanos para trabalharem nas surgentes e crescentes indústrias. Essa ficou conhecida como a primeira fase da Primeira Revolução Industrial, que foi responsável pelo desenvolvimento de aglomerações urbanas ao redor de indústrias. Entretanto, com o passar dos anos, essa mão de obra passa a migrar do campo e se estabelecer nestas regiões em um fluxo maior que a sua capacidade de absorção, dando origem aos cinturões de pobreza (PEREIRA, 2009).

E de forma geral, até o início do século XX, não existia preocupações acerca a proteção dos recursos ambientais e da conservação para as gerações futuras, nisto incluído a qualidade do ar, onde prevalecia a ideia de que tais meios e fontes naturais estariam inevitavelmente presentes tanto no que confere a sua quantidade e a sua qualidade possibilitando a manutenção dos sistemas ecológicos. Como resultado desse processo desordenado migratório e de expansão urbana, sem se preocupar com questões de cunho ambiental, iniciou-se um encadeamento de expansão e surgimento de novos centros urbanos, conurbações e megacidades, com seus respectivos problemas inerentes, como: crescimento populacional desordenado, falta de infraestrutura adequada e meios de transportes eficientes, aumento da criminalidade e intensificação de processos de destruição ambiental, inclusive da qualidade do ar, expondo as populações a este cenário degradante, visto que residem próximas às fontes de emissões dos rejeitos e/ou resíduos (SANTOS; SKORA, 2020).

Tais eventos se intensificaram ao longo das décadas e dos processos de Revoluções Industriais, em especial no período pós a Segunda Grande Guerra Mundial, onde prevalecia um sentimento de “paz” e bem-estar social, inclusive impulsionado pelo *American Way of Life*, onde se transmitia uma imagem de felicidade e vida completa tendo como base uma sociedade de consumo e padronizada. Associado ao evento, o desenvolvimento da medicina e

a confiança em um mundo melhor após guerra, houve um intenso crescimento populacional, fruto de uma maior natalidade e do aumento da expectativa de vida (ANDREOLI; DONHA, 2020).

Adicionado a isso, o desenvolvimento de novos recursos técnico/científicos que permitiram uma intervenção cada vez maior no meio ambiente, com a extração de recursos de mais difícil acesso e em maior escala. Desta forma, a pressão sobre os recursos naturais, cresceram de forma exponencial, pois além do aumento da população, que por sua vez eleva a necessidade de consumo de insumos, houve um aumento de consumo também per capita, impulsionado por um aumento de poder de compra e de renda da população de forma geral, por mais que esse venha acompanhado de uma distribuição desigual e excludente. Resultante disto, aumenta-se proporcionalmente os impactos ambientais em todas as suas esferas, gerando a poluição e contaminação dos solos, das águas, do ar e de todos que vivem e interagem por estes meios.

Diante da constante evolução de episódios de degradação ambiental e de poluição, incluindo sobre outros meios ambientais, iniciou-se cada vez mais uma preocupação global sobre o assunto, envolvendo cientistas e pesquisadores. A institucionalização de tal problemática, tem como base três eventos que representaram um divisor de águas na abordagem do assunto, servindo de referência para realização das grandes conferências desta temática posteriormente, sendo eles: a criação do Clube de Roma, a 45ª seção do Conselho Econômico e Social das Nações Unidas (ECOSOC) e a Conferência da Biosfera, todos ocorridos em 1968 (SANTOS; SKORA, 2020).

O primeiro resultou em um relatório que, pela primeira vez, afirmou que a natureza possui elementos políticos, econômicos, sociais e naturais, que formam o sistema global; o segundo representou a primeira vez na qual a ONU debateu as questões ambientais, abordando o tema da perda da qualidade do meio ambiente humano em decorrência da poluição dos meios, efeitos da utilização dos agrotóxicos e da destinação dos resíduos, ficando clara a urgência do tema. O terceiro, e último evento citado, foi fruto do anterior, tendo como objetivo aumentar o conhecimento da relação do meio ambiente e o ser humano e o desenvolvimento de conhecimento, permitindo o seu uso de forma equilibrada. Estes deixaram exposto que as questões ambientais só serão solucionadas mediante ações em conjunto entre países e setores da sociedade (SANTOS; SKORA, 2020).

Neste âmbito, um evento que merece destaque e que promoveu a importância da qualidade do ar foi a Conferências das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, de 1992 (ECO-92). Como resultado do evento, foi elaborado o documento

denominado Agenda 21. Nele, foram estabelecidas políticas e ações de cunho ambiental, a se destacar: mudanças nos processos de consumo, repensando e reduzindo a dependência do uso de combustíveis fósseis e carvão mineral, onde os países participantes deveriam combater, entre outros, a poluição do ar e a mudança climática global, promovendo a proteção da atmosfera através de ações locais. A ECO-92 foi considerada um marco na história na cooperação internacional na questão ambiental, sendo através dela criado o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) (GUERRA; MIRANDA, 2011; NOSSA; RODRIGUES; NOSSA, 2017).

Já no cenário Brasileiro, historicamente o país se caracteriza por uma ocupação sem considerar a questão ambiental em seu planejamento e de forma predatória em relação aos recursos naturais, onde desde o período pós independência estimula-se a expansão e ocupação do território no sentido de interiorização, de forma a garantir a soberania das terras, e para isso incitava-se e desenvolvia-se atividades agrícolas e pecuárias, ocasionando o desmatamento de áreas densamente vegetadas e virgens e criando uma mentalidade de progresso e desenvolvimento atrelado a sua destruição.

Na década de 1930, o governo começou a adotar algumas medidas pontuais de controle sobre a exploração de alguns recursos, criando o Código das Águas, da Mineração e Florestal (1934) e o Código da Pesca (1938), contudo a gestão se dava de forma desordenada e visava apenas a manutenção de recursos futuros. Já em 1965, foi concebido o Estatuto da Terra e o Código Florestal, propiciando o poder público a interferir de forma mais contundente em atividades degradadoras, criando as condições propícias para o aparecimento da legislação ambiental moderna. Posteriormente, com o advento da Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, de 1992, o Brasil como nação participante, adota uma série de medidas com o objetivo de cumprir com os acordos firmados. Entre eles, destacam-se: a criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) em 1973; em 1981 é definido a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), além de uma série de reestruturações e criações de órgãos estaduais (ANDREOLI; DONHA, 2020).

Desta forma, entre 1950 e 1960, predominavam ações pontuais relacionadas à preservação da qualidade ambiental, contando apenas com legislações esparsas. A gestão ambiental era considerada pelos empreendimentos, unicamente, como forma de cumprir a lei, sendo apenas encarada com maior preocupação devido à escassez evidente de certos recursos, como a madeira. Até a década de 1970, preponderavam também, quase que exclusivamente, as tecnologias de remediação, ou seja, só após a ocorrência de desastres buscava-se remediar

os efeitos deletérios ambientais e sociais dos eventos. A seguir a Eco-92, e demais eventos que se sucederam, adotam-se nas empresas processos chamados de fim-de-tubo, que são a aplicação de tecnologias nos resíduos já gerados, de forma a minimizar seus impactos, não buscando, contudo, a sua reutilização ou não geração. Somente posteriormente, na década de 1990, é que se compreende que deve se agir pensando no sistema produtivo como um todo e em todas as suas etapas (FILHO; LOIOLA, 2020).

Inserido nessa conjuntura, de degradação contínua e crescente de todos os meios ambientais a nível mundial, incluindo no Brasil, encontra-se o tema da poluição atmosférica. A atmosfera, como resultado da expansão humana, das revoluções tecnológicas e do sistema econômico vigente, se apresenta especialmente degradada, poluída e contaminada devido à presença de indústrias e atividades antrópicas que promovem a queima de combustíveis fósseis, via veículos automotores entre outros, ejetando poluentes em um nível maior que a sua capacidade de assimilação. Soma-se a isso, o agravante da maior parte da população mundial residir em centros urbanos, locais estes onde se concentram essas atividades e, conseqüentemente, seus impactos negativos.

A poluição atmosférica, segundo *The Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD, 2001), trata-se da presença de substâncias contaminantes ou poluentes no ar, não sendo devidamente dispersadas ou absorvidas por sumidouros e que acabam por impactar negativamente o estado de bem-estar humano, ou ainda provocam efeitos nocivos a componentes ambientais. Pode ter como origem fontes naturais, assim como fatores antrópicos, sendo, portanto, um processo natural ao longo da existência do nosso planeta. Contudo, com o advento das Revoluções Industriais e seu fortalecimento pós Segunda Grande Guerra Mundial e o respectivo aumento de emissões de poluentes no ar, a atmosfera perdeu seu potencial de autodepuração devido ao volume e intensidade dos lançamentos causados pela atividade humana. Assim, fenômenos naturais atmosféricos, como chuvas, correntes de ar e ventos passaram a ser insuficientes para manter a sua qualidade (GUERRA; MIRANDA, 2011).

Russo (2002) reafirma tal situação, na qual a poluição ambiental se tornou uma problemática, devido ao modelo de desenvolvimento e obtenção de energia baseado na utilização de matéria prima poluente, como carvão, lenha e derivados de petróleo, degradando a qualidade do ar principalmente nos grandes centros urbanos e industriais, com reflexos graves sobre a qualidade da saúde de suas populações. Junto a isso, ocorre um processo de adensamento populacional e seu crescimento em tais centros, reunindo em um mesmo ambiente tais poluentes e seus habitantes.

Assim, conforme constatado por Esteves et al. (2008), tais questões relacionadas a degradação dos recursos ambientais está intrinsecamente associada ao modelo de desenvolvimento econômico capitalista, onde ainda predomina a mentalidade de extração, produção, consumo e descarte, subsidiado por lógicas como obsolescência programada, onde o objetivo é o consumo cada vez maior, tendo como resultado um alto custo de devastação ambiental.

Para fins de comparação, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) em partes por milhão (ppm) na atmosfera, aumentou de 316,7 no ano de 1960 para 368,4 em 1999. Em 2016 atingiu-se a marca de 404,21 ppm como média anual. Se tal ritmo persistir, irá ser atingido a marca de média anual de 700 ppm de CO₂ antes do fim do século XXI, sendo que o nível minimamente seguro para evitar alterações globais do clima é de 350 ppm (ANDREOLI; DONHA, 2020).

Um episódio crítico de poluição atmosférica e que merece destaque, se tornando um marco na questão da qualidade do ar, foi o ocorrido em Londres, Inglaterra em 1952, sendo este o mais clássico incidente de poluição do ar, ocasionando aproximadamente 12.000 pessoas a óbito e deixando outras 100.000 doentes, especialmente aquelas mais vulneráveis. Este evento ficou conhecido como o *smog* londrino, em um episódio de duração aproximada de cinco dias no mês de dezembro, devido à alta concentração de Material Particulado na atmosfera e de dióxido de enxofre (SO₂), resultante das intensas atividades industriais e movimentação de veículos, que foram retidas a níveis superficiais devido a ocorrência do fenômeno de inversão térmica e a ausência de ventos. (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Com relação ao Brasil, em 1972 ocorreu o primeiro *smog* fotoquímico da cidade de São Paulo. Este foi acarretado principalmente pelas emissões veiculares e a ocorrência de inversão térmica. Na década de 1980 na cidade de Cubatão, devido a presença de inúmeros complexos industriais, altos níveis de poluição atmosférica são registrados, principalmente devido a presença de MP, levando a população local a viver constantemente sobre estados de atenção e alerta, com vários episódios de estado de emergência declarados. Cubatão nesta época ficou conhecida como uma das cidades mais poluídas do mundo, onde recebeu a alcunha de: “Vale da Morte”, sendo que desde o início do monitoramento da qualidade do ar na região em 1981, até 1990, os índices estabelecidos para a concentração de MP abaixo de 10 micrômetros foram violados (PROCÓPIO, 2013).

Mediante tal quadro, o enfoque desta pesquisa é direcionado ao Material Particulado. Conforme a *World Health Organization* (WHO, 2022), em seu documento *WHO global air quality guidelines*, o Material Particulado está presente tanto nos ambientes urbanos como nas

demais áreas, sendo formado por uma mistura complexa com vários tipos de compostos químicos e diferentes características físicas. Segundo pesquisadores da área, os riscos de exposição a tal elemento são variáveis e complicado de se estimar devido a sua heterogeneidade, visto que o potencial de degradação da saúde por partículas está atrelado aos seus diâmetros, suas composições físicas e químicas e fonte de emissão.

De forma geral, conforme Mimura (2017) e Baird e Cann (2011), em função da penetração no trato respiratório, eles podem ser classificados, a depender do seu diâmetro aerodinâmico (d_a), como Partículas Respiráveis (MP até 2,5 μm) e Partículas Inaláveis (MP até 10 μm), sendo estas as maiores responsáveis dentre todo o MP por interferir na qualidade do ar de zonas urbanas. Opcionalmente, recebem o nome de Material Particulado Moda Fina e Moda Grossa, respectivamente. Ainda conforme a *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2021), o Material Particulado é formado por uma mistura de partículas sólidas e líquidas encontradas na atmosfera, a exceção da água pura.

Desta forma, as partículas são classificadas geralmente de acordo com suas propriedades aerodinâmicas, visto que com este viés é possível determinar seus processos de transporte, remoção e deposição, assim como o possível nível de penetração no sistema respiratório. Além disso, as partículas com $d_a \leq 2,5 \mu\text{m}$ e com $d_a \leq 10 \mu\text{m}$, são nomeadas MP_{2,5} e MP₁₀, respectivamente (BAIRD; CANN, 2011).

Alguns fatores contribuem para a variação espacial e temporal dos poluentes, inclusive do MP, como a distribuição local das fontes de emissão e seus padrões de operação, as características dos poluentes e suas dinâmicas e as condições meteorológicas. Com certa frequência, as emissões obedecerem um padrão temporal e espacial de emissões, o fator principal e mais importante é a condição meteorológica, sendo que esta terá um papel preponderante na variação ao longo do tempo na concentração deste poluente (WHO, 2022).

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo descrever, através de uma pesquisa exploratória de cunho bibliográfico, as características e classes, assim como meios de emissão dos Materiais Particulados. Também busca enunciar como os fatores meteorológicos e climáticos interagem com a concentração de Material Particulado, relatando os mecanismos e meios de interação entre os mesmos e os impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes da dinâmica supracitada. Especial destaque e enfoque será conferido a parcela representada pelo Material Particulado Inalável e suas interações nas zonas urbanas dos municípios.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral proposto, são delimitados os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar pesquisa bibliográfica a respeito dos principais poluentes atmosféricos, entre eles o Material Particulado e suas classes e formas de classificação;
- b) relatar informações acerca da atmosfera e seus mecanismos de funcionamento e como estes em conjunto com os fenômenos meteorológicos atrelados ao tempo e ao clima impactam e influenciam na concentração e na dispersão do MP₁₀;
- c) expressar os impactos ambientais, econômicos e sociais, entre eles, na saúde humana, da presença de tal elemento no ar;
- d) demonstrar a legislação ambiental nacional e as recomendações internacionais quanto à presença e concentração deste poluente.

1.3 JUSTIFICATIVA

A poluição atmosférica é responsável por inúmeros impactos sociais, ambientais e econômicos globais, especialmente em países em via de desenvolvimento que se encontram em processo de expansão de atividades industriais e econômicas, mas não contam com políticas públicas, legislações, fiscalizações e recursos para um correto mensuramento dos padrões de qualidade do ar, assim como técnicas para reduzir suas concentrações.

Segundo Baird e Cann (2011), a Moda Fina ($d_a \leq 2,5 \mu\text{m}$) é a maior responsável dentre todo o MP por interferir na qualidade do ar de zonas urbanas. Segundo WHO (2022), mais de 90% da população global referente ao ano de 2019 vivia em áreas nas quais a concentração de MP_{2,5} excedia os parâmetros de qualidade estabelecidos à época pela WHO *air quality guideline* de 2005, que era de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Segundo a organização, esta poluição por MP é o maior risco ambiental global, onde a mesma estima que mais de 7 milhões de pessoas morrem anualmente devido aos efeitos da poluição do ar. Desta forma, tal matriz de poluição é estimada como uma das cinco primeiras causas de risco de morte, juntamente com fatores como consumo de tabaco, em um total de 87 fatores de risco (WHO, 2022).

Outro viés de impacto se dá através das perdas econômicas, onde segundo estimativas do Banco Mundial referentes ao ano de 2013, houve um impacto econômico global de perda

de 143 bilhões de dólares via perda de renda por trabalho e 3,55 trilhões em perdas de bem-estar devido a exposição a tal material (WORLD BANK, 2016).

Adicionais efeitos podem ser observados decorrentes de tais processos, como redução da produção agrícola, danos florestais, deterioração de obras de arte e construções, além da contaminação dos recursos hídricos, alimentos e solos (QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007). Gouveia et al. (2006) encontraram associações significativas na relação de aumento nos níveis de poluentes atmosféricos e aumento de mortalidade e nas hospitalizações nos municípios de São Paulo e Rio de Janeiro.

E apesar dos esforços globais de monitorar diversos locais de forma ampla, com o objetivo de controle e monitoramento da exposição da população aos poluentes atmosféricos mais comuns e de maior gravidade, o mesmo não é verificado na maioria dos casos. De forma geral, as regiões que apresentam os maiores índices de poluição atmosférica e maior deficiência na rede de monitoramento são os países subdesenvolvidos e aqueles em vias de desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

Por sua vez, os fenômenos meteorológicos exercem influência direta na poluição do ar, permitindo ainda estabelecer a conexão entre as fontes de poluição e os receptores, visto que os mesmos promovem, em maior ou menor grau, o transporte e dispersão dos poluentes, que podem apresentar valores diferentes mediante a emissões constantes de forma espacial, devido a processos que ocorrem na atmosfera, como de origem física, representado pela diluição, e ainda processos químicos.

Com isso, tais fatores vão ser fundamentais para a definição da qualidade de ar no qual uma população está exposta, e como consequência, seus efeitos adversos sobre a mesma e sobre o meio ambiente.

Desta forma, o estudo viabiliza um levantamento acerca das características desta modalidade de poluente, como: as suas diversas formas de emissão, transporte, diluição e suas classes, permitindo assim compreender devidamente como ele impacta a saúde, a economia e o meio ambiente. O seu conhecimento, atrelado a identificação dos mecanismos atmosféricos e climáticos de diluição e remoção, visto que são os elos entre fonte emissora e receptora, favorece o conhecimento da tendência de distribuição do poluente em diferentes épocas do ano e suas relações com os diferentes parâmetros meteorológicos.

Tais dados levantados permitem o entendimento dos diversos critérios e impactos sobre a saúde das populações, podendo servir de subsídio para a elaboração e realização de novos estudos sobre o tema, inclusive no desenvolvimento de novos trabalhos relacionados sobre o assunto, colaborando como fonte de informações para a elaboração de pesquisas

práticas, aplicadas às realidades locais, promovendo sociedades com um maior bem-estar social e ambientalmente equilibradas.

Tem potencial para contribuir na atualização de planos diretores municipais; na avaliação da qualidade do ar dos locais e seu atendimento às normas, legislações e indicações vigentes e na instalação de medidas contingenciadoras e de controle, caso seja verificado a necessidade. Permite-se assim, potencialmente, uma caracterização de cenários, quanto a este poluente, frente às variações do tempo atmosférico e o atendimento aos parâmetros e recomendações nacionais e internacionais.

2 METODOLOGIA

Perante aos objetivos expostos e previamente descritos, tal pesquisa, no tocante ao seu nível, caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, visto que esta busca proporcionar visão geral, do tipo aproximativo, acerca de determinado tópico, podendo servir como uma primeira etapa de uma pesquisa mais ampla, viabilizando uma delimitação do tema a priori, gerando através da utilização de técnicas de coletas de informações, um produto final com um recorte mais esclarecido e passível de investigação e de aplicação prática, utilizando procedimentos mais sistematizados (GIL, 2008).

Segundo Gil (2008), o delineamento da pesquisa, ou seja, a estratégia e meios técnicos para obter as respostas ao que se objetiva neste trabalho, ou ainda os meios técnicos utilizados para se obter os dados, podem ser enquadrados em dois grandes grupos: “fontes de papel” e “fontes proveniente de pessoas”, dependendo ainda dos recursos financeiros, disponibilidades e nível de precisão necessário.

Nesse cenário, adota-se a utilização primeiramente de uma pesquisa bibliográfica, como uma estratégia de análise e estruturação ordenada de conteúdos da melhor forma a permitir uma compreensão e coleta de informações do tema delimitado e de aspectos relacionados, usando para isso principalmente artigos científicos e trabalhos acadêmicos, disponibilizados em revistas e periódicos eletrônicos, e livros. Permite-se assim, colher aspectos de fenômenos de forma ampla e a seleção dos de maior interesse.

Utilizou-se principalmente três ferramentas eletrônicas: a *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), o Google Acadêmico e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), via pesquisa das seguintes palavras chaves: poluição atmosférica, Material Particulado, Moda Grossa, Material Inalável, MP₁₀, atmosfera, particulados e relação clima e concentração de Material Particulado. A partir dessas e da verificação da bibliografia utilizada, se teve ainda acesso a outros trabalhos pertinentes, assim como houve o emprego de material da instituição Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Na sequência foi realizada uma pesquisa documental, com destaque a classe dos registros institucionais escritos, como: relatórios e legislações pertinentes ao assunto, que tratam dos limites impostos mediante parâmetros estabelecidos de forma regional, ou ainda recomendações, baseadas em estudos e pesquisas, e publicadas como diretrizes de orientações. Por fim, acessaram-se sites de órgãos governamentais e de entidades ambientais, ou que abordam assuntos relacionados a este trabalho de conclusão de curso (TCC), para a

obtenção de informações e padrões legais e o cruzamento com os dados obtidos anteriormente.

Ressalta-se, que por ser um tema de exploração recente e com pesquisas em andamento e atualizações constantes, muitos elementos se encontram mais definidos e estruturados em literatura internacional, levando a pesquisa e a inclusão destas na bibliografia consultada e na pesquisa de palavras chaves (com suas respectivas traduções).

3 A ATMOSFERA TERRESTRE

Conforme apresentado por Baird e Cann (2011), a atmosfera terrestre é entendida como uma relativamente fina camada de gases que envolve toda a superfície do globo, sendo composta por várias substâncias. Seus componentes principais, considerando que a mesma se encontra em um estado de não poluição e composição seca, se dão com o predomínio de gases como nitrogênio diatômico (N_2) e oxigênio diatômico (O_2), estes representando respectivamente 78% e 21% do número total de moléculas. Demais gases podem ser encontrados em menores concentrações, tais quais: argônio (Ar), compondo 1%; e dióxido de carbono, totalizando 0,04%.

O vapor d' água, em uma atmosfera terrestre real, se encontra sempre presente, mas com uma grande flutuação em sua concentração e presença, onde varia em até 3% do volume total ocupado pelos gases, mas ficando na maior parte do tempo por volta de 1%. Sua presença tende a ser maior em zonas tropicais e menor sobre desertos, variando de acordo com a temperatura, localidade, altitude e época do ano. Sua presença é essencial para processos químicos atmosféricos, tendo em vista que é fonte disponível de liberação de radicais hidroxila (OH^*) e hidroperóxido (HO_2^*), possibilitando uma série de processos físico-químicos (PAIXÃO, 2015).

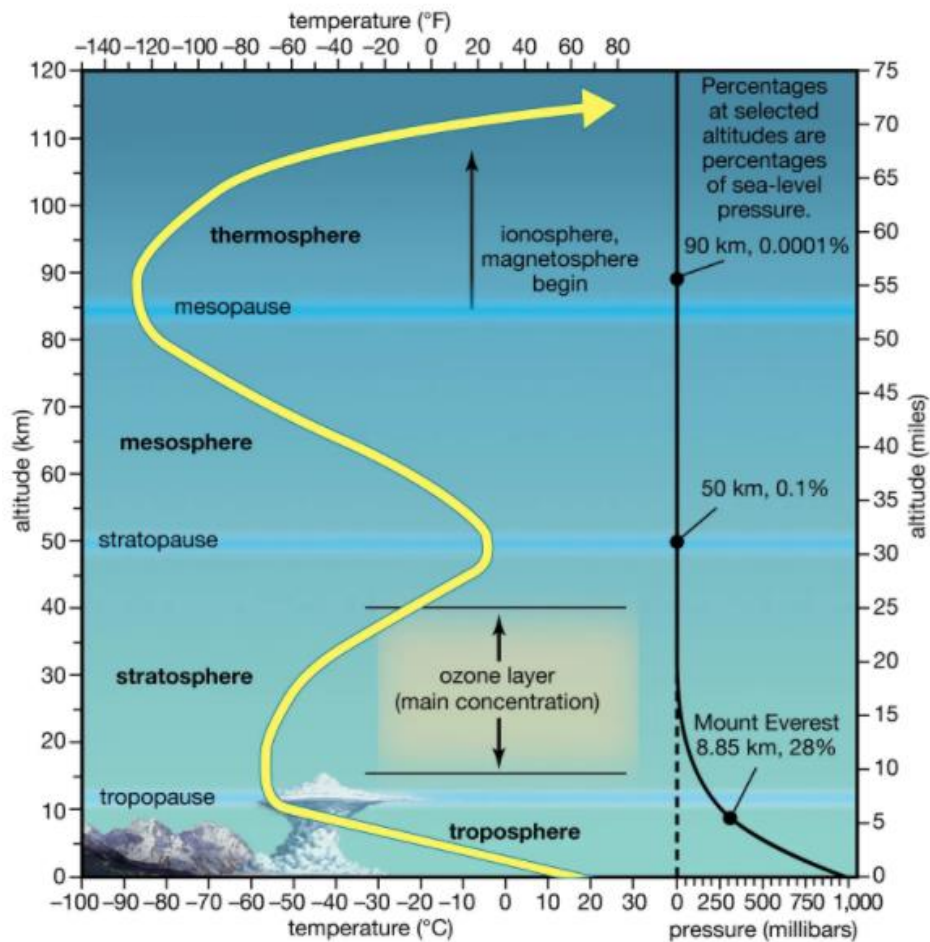
Press et al. (2006) informam que traços de outros gases também podem ser encontrados, além de outras substâncias, como partículas de sólidos e líquidos em forma de suspensão, denominados de Material Particulado, que podem representar riscos ao meio ambiente. Ressalta-se ainda, que estes se mostram presentes de forma natural no ambiente, advindo de fontes não antropogênicas, contudo sua emissão em excesso e contínua, via atividades humanas, é que caracteriza preocupação no cenário atual. Por fim, a espessura atmosférica corresponde a 1% do raio da Terra e contém 0,0001% da massa do sistema terrestre, o que corresponde a $5,13 \times 10^{18}$ kg (PRESS et al., 2006).

Ou seja, a mesma não é um meio homogêneo, mas sim uma mistura de substâncias, que de tal maneira e na presente combinação, a diferencia dos demais planetas do sistema solar, sendo que são essas propriedades proporcionadas por tais gases e nessas presentes concentrações que possibilitaram o desenvolvimento, a evolução da vida e a sua manutenção, a protegendo contra o ambiente hostil do espaço sideral, absorvendo parte da radiação solar e moderando a temperatura do ar. Trata-se de um recurso natural sem fronteiras definidas e não isolado, com fronteiras abertas e detentor de um complexo sistema de inter-relações de

temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, proporcionando um equilíbrio climático entre as diversas zonas e regiões planetárias (PAIXÃO, 2015).

A mesma encontra-se presente e presa à superfície terrestre devido a ação da força gravitacional do nosso planeta. E, devido a propriedade de compressibilidade dos gases, quanto mais próximo a superfície maior a sua densidade, o que acaba por levar a 98% de sua massa estar localizada a até 29 quilômetros de altitude (MENDONÇA; OLIVEIRA, 2007). Esta, como descrito por Stull (1999), é subdividida para fins de pesquisa e estudo em quatro regiões concêntricas, tendo como base a temperatura que apresentam, visto que as suas temperaturas variam de modo complexo em função da variação altimétrica. Essas regiões e suas nomenclaturas a se saber são: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera, em acordo com a Figura 1 a seguir.

Figura 1 – A atmosfera terrestre, suas camadas e variações de temperatura e pressão



Fonte: PIELKE (2021)

Na troposfera, a temperatura do ar, de forma geral, diminui com o aumento da altitude, em uma taxa média de $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, chegando a valores mínimos de aproximadamente 58°C negativos, fato que ocorre ao se atingir os 12 km de altitude. É no interior dela que desenvolve-se quase a totalidade das atividades humanas e onde a sociedade se desenvolve. É nela que fenômenos como ventos uivantes e brisas fracas, chuvas, céus azuis e demais eventos, que tipicamente associamos com o tempo atmosférico, ocorrem. Destaca-se, porém, que a sua altitude é variável, a depender da latitude e do tempo atmosférico, atingindo valores máximos próximo a linha do Equador (18 km) e mínimos sobre os polos (6 km) (BROWN; LEMAY; BURSTEN, 2013).

Acima desta camada apresentada, conforme Brown, Lemay e Bursten (2013), encontra-se a estratosfera, onde a temperatura aumenta com a elevação da altitude, chegando a máxima de aproximadamente 2°C positivos ao atingir a marca de 50 km. Na sequência, encontra-se a mesosfera e a termosfera. Ressalta-se que, na troca entre cada uma das regiões apresentadas, ocorre um extremo de temperatura e uma mudança em seu sentido de variação, correspondendo estas às chamadas zonas de limites. Estas são de suma importância, pois configuram barreiras nas quais os gases se misturam com os de outras camadas de forma notoriamente mais lenta que em suas próprias zonas. Essas regiões de transição são denominadas: tropopausa (entre troposfera e estratosfera), estratopausa (entre estratosfera e mesosfera) e mesopausa (entre mesosfera e termosfera).

Como resultado, tem-se que os gases e demais poluentes gerados na troposfera migram para a estratosfera em taxa de fluxo extremamente lento, ficando praticamente retidos na camada em que nos encontramos inseridos. No que se refere a qualidade do ar e seu estudo, Stull (1999) e Baird e Cann (2011) apontam que a troposfera é a mais importante delas, por estar envolvendo diretamente a superfície planetária e conter 85% de toda massa atmosférica, onde processos de reatividade encontram-se constantes entre seus elementos constituintes, seja em uma atmosfera pura ou com a presença de poluentes.

É nesta extensão que ocorrem, predominantemente, os fenômenos que promovem a ciclagem biogeoquímica de inúmeros elementos e substâncias químicas e os fenômenos meteorológicos responsáveis por definir as condições climáticas, como a formação de nuvens, chuvas e ventos (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2004).

3.1 A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A troposfera, devido aos seus padrões e características, é didaticamente subdividida em Camada Limite Atmosférica (CLA), também chamada Camada Limite Planetária (CLP), e Atmosfera Livre, onde a primeira é caracterizada por ser a parte de fato da troposfera que sofre a ação direta das ações desenvolvidas na superfície da Terra e é influenciada por estas, em uma escala de tempo de até 1 hora. Entre as unidades passíveis de tais interferências, se encontram: a força de atrito superficial, evaporação, transpiração, transferência de calor, modificações de fluxo de vento pela superfície e inclusive a emissão de poluentes atmosféricos. A depender destas, e suas intensidades, a altura desta zona varia entre algumas centenas de metros até a alguns quilômetros (STULL, 1999).

Devido a estas interações, a CLA geralmente apresenta característica turbulenta e as emissões nesta são dispersadas pelas turbulências, podendo ocupar todo o seu volume, a depender das características das fontes emissoras e das propriedades físico químicas locais. Para enfatizar sua importância neste processo, a mesma é convenientemente referida como Camada de Mistura. Desta forma, o volume ocupado por essa área irá representar o espaço disponível de dispersão dos poluentes, e como resultado, a tendência é de que quanto maior a sua altura, maior a capacidade de dispersão destes.

O fato exposto é de maior importância nas zonas urbanas e industriais, focos de liberação de tais substâncias e onde reside a maior parte da população. Além da altura influenciar na forma de dispersão da poluição atmosférica, outros parâmetros da CLA influenciam, como: coeficiente de difusão e estabilidade atmosférica, que por sua vez dependem das condições meteorológicas e de turbulência da camada. Assim, essa interação de fatores juntos com as atividades desenvolvidas na superfície, e suas configurações, são responsáveis pela qualidade do ar da região (BARBOSA, 2018).

Malheiros e Dias (2004) ressaltam que o fato da Camada Limite Atmosférica sofrer interferência de características superficiais, resulta em uma zona que é afetada em curtas escalas de tempo, a depender da hora do dia, devido principalmente a variável de radiação solar incidente e os eventos deste decorrentes. Esta situação resulta em uma análise da mesma principalmente quanto ao período diurno e noturno, visto que ao longo do dia ocorre incidência dos fluxos de energia superficiais mais preponderantes que os noturnos, o que resulta em CLPs mais elevadas ao longo do dia e uma atmosfera mais estável a noite, resultando em uma CLA reduzida.

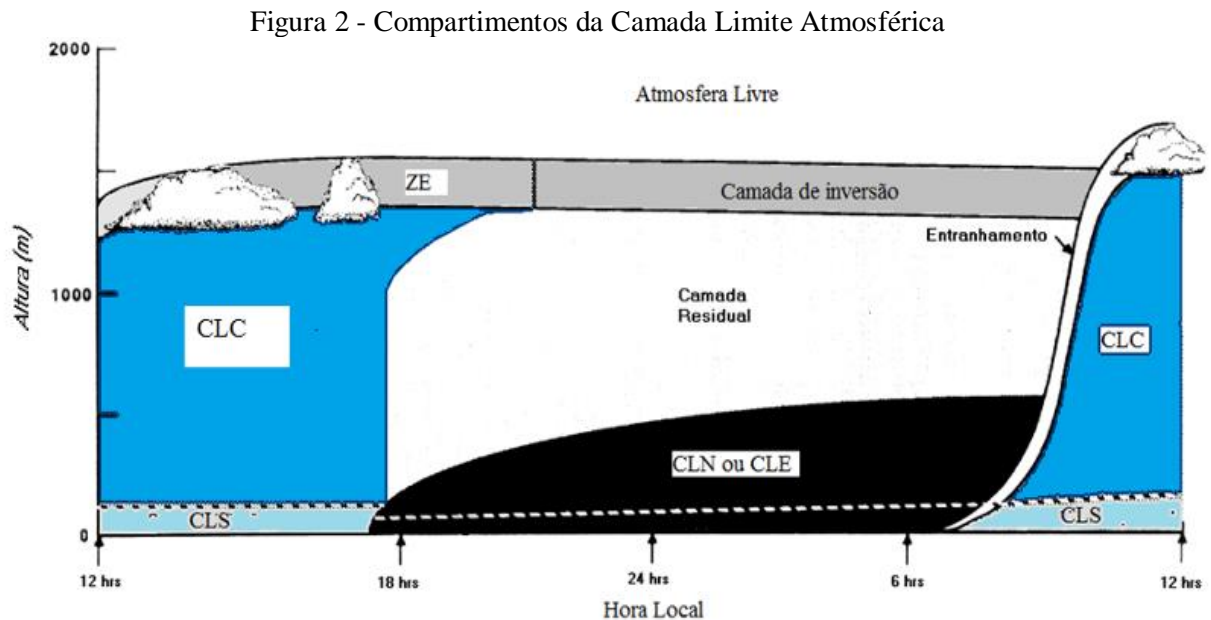
Isso advém da grande variação de temperatura na baixa troposfera ao longo do dia, quando estas cobrem superfícies terrestres. A característica mencionada é resultante desta camada praticamente não absorver quase nenhuma radiação solar que a atinge, sendo que por volta de 90% dela é absorvida pela superfície terrestre. Por conseguinte, são os fenômenos de aquecimento e resfriamento e a emissão desta energia pelas superfícies que modificam a Camada Limite Atmosférica através de suas alterações de forças via processos de transportes. O principal deles é a turbulência, e com frequência é utilizado para a definição da mesma (STULL, 1999). Os fenômenos que interferem no processo de fluxo de energia, transporte e modificação da CLA, são os processos de: condução, convecção, advecção, condensação e radiação.

A condução se baseia em uma transferência de calor via molécula a molécula entre dois corpos que estão em contato com distintas temperaturas, onde o fluxo de calor se dá de forma lenta e no sentido do corpo mais quente para o mais frio. A convecção, responsável pela turbulência, é o processo principal responsável pelo fluxo vertical das correntes aéreas, sendo o que transporta a maior quantidade de calor, umidade e poluentes nesse sentido de deslocamento. Esta se dá quando uma superfície quente, ao transferir calor via contato ou radiação para o ar sobreposto, aumenta sua energia cinética e conseqüentemente o seu espaço ocupado, o tornando menos denso do que o ar ao redor, provocando sua elevação. Em contrapartida, para compensar a nova zona tomada por este, formasse uma corrente descendente de ar frio, fechando a célula convectiva (MENDONÇA; OLIVEIRA, 2007).

A advecção corresponde ao movimento horizontal das camadas de ar, sendo o maior agente transportador neste sentido espacial, estando presente quando um volume de ar se desloca horizontalmente, criando um gradiente de pressão entre áreas contíguas. A condensação configura na transformação de uma substância em seu estado gasoso para o estado líquido, como o vapor de água em chuva, e é responsável pela liberação de energia (calor), que havia sido absorvida no processo de evaporação, para o sistema. A radiação, por sua vez, está relacionada diretamente ou indiretamente a todos os processos apresentados anteriormente, sendo o principal modo de propagação de energia neste sistema, chegando via emissão solar na forma de ondas eletromagnéticas, podendo ser refletida, absorvida ou transmitida (MENDONÇA; OLIVEIRA, 2007).

A CLA, em conformidade com Silva (2008), pode ainda ser subdividida de acordo com os processos físicos envolvidos, em: Camada Limite Convectiva (CLC), Camada Residual Noturna (CRN) e Camada Limite Estável (CLE) ou Noturna (CLN). Isso é resultante da variação das forçantes superficiais, que acabam por alterar sua dinâmica, estrutura e

dimensões, devido em maior parte as implicações das variações de energia advindas da radiação solar ao longo do tempo, e mais notadamente no caso aqui demonstrado, ao longo do dia. Estas Subdivisões podem ser visualizadas na Figura 2.



Como apresentado por Buske (2004), a Camada Limite Atmosférica depende da intensidade da radiação solar e de seus movimentos turbulentos para expansão. Desta forma, a Camada Limite Convectiva tem origem e se expande com o nascer do sol, no qual a superfície absorve quantidade significativa de radiação solar, se aquecendo, e emitindo energia na forma de calor. Com isso, há a formação de grandes correntes convectivas verticais de ar que se tornam cada vez mais poderosas à medida que a superfície se aquece, formando jatos de ar mais potentes, potencializando a altura dessa camada.

Com o pôr do sol, tal sistema se enfraquece e há uma retração na altura da CLC até o seu cessar, e ao longo desse processo de retração da CLC, a região que outrora pertencia a Camada Limite Convectiva se torna a Camada Limite Residual (CLR), permanecendo com as mesmas características que outrora apresentava, quando pertencente a CLC. A CLR, logo, não tem contato com o plano superficial, ficando alocada acima da CLE (BUSKE, 2004).

A Camada Limite Noturna, como resultante deste processo, se faz presente após o resfriamento do substrato, onde ocorre uma inversão no fluxo de calor (visto que este sempre transita de um corpo mais quente para um de menor energia térmica), em outras palavras, o sistema passa a utilizar a energia cinética dos jatos de turbilhões verticais, permitindo a existência destes apenas de forma residuais, sucedendo um ambiente mais estratificado.

Quando em zonas urbanas e industriais, tal fenômeno representa uma menor capacidade de dispersão e diluição dos poluentes, se dando preferencialmente em movimentos horizontais e lentos. Sua altura varia usualmente entre 100 m a 300 m (BARBOSA, 2018).

3.2 PRINCIPAIS POLUENTES E SEUS EFEITOS ADVERSOS

Dentro de tal contexto, em que a atmosfera se apresenta como um meio ambiental passível de poluição e é vulnerável à degradação e a alteração da sua composição, levando a uma série de alterações de tempo, clima e de equilíbrio de reações, interferindo na capacidade de manutenção da vida, cabe aqui a definição do conceito de poluição atmosférica e sua caracterização. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021) define que o nível de poluição atmosférica se baseia na medição da quantidade de substâncias poluentes presentes no ar, sendo que estas são compostas por grande variedade de elementos, onde segundo o CONAMA, Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018, o poluente atmosférico pode ser definido como

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. (BRASIL, 2018, Art. 2. § I).

Esta grande variedade de elementos torna difícil o estabelecimento de classificações, sendo que a interação entre as fontes de emissão e as características atmosféricas regionais é que vai estabelecer o nível de qualidade do ar presente, que será responsável, por sua vez, sobre o surgimento de efeitos colaterais desta poluição sobre a população, estando esta última inserida na classe dos receptores, assim como animais, vegetação e materiais. Para um melhor entendimento e ordenação das substâncias poluentes, essas podem ser sistematicamente subdivididas em classes, conforme demonstrado pelo Quadro 1.

Quadro 1 - Principais poluentes atmosféricos por classe de composição

Compostos de Enxofre	Compostos de Nitrogênio	Compostos Orgânicos	Monóxido de Carbono	Compostos Halogenados	Metais Pesados	Material Particulado	Oxidantes Fotoquímicos
SO ₂	NO	hidrocarbonetos álcoois	CO	HCl	Pb	mistura de compostos no estado sólido ou líquido	O ₃
SO ₃	NO ₂	aldeídos		HF	Cd		formaldeído
Compostos de Enxofre Reduzido:	NH ₃	cetonas		cloretos	As		acroleína
(H ₂ S, Mercaptanas, Dissulfeto de carbono, etc)	HNO ₃	ácidos orgânicos		fluoretos	Ni		PAN
sulfatos	nitratos				etc.		etc.

Fonte: CETESB (2021)

As maiores fontes desta poluição advêm do uso sistemático dos combustíveis fósseis como matriz energética e matéria prima, a se saber como destaque: o petróleo e o carvão mineral. Como agravante a essa situação, o consumo e o uso global destes vêm crescendo ao longo do tempo. E nas maiores concentrações urbanas e de maior densidade, a poluição atmosférica automotora é o principal poluente deste sistema. Soma-se a isso, o fato de que o número médio de km rodados, por carro, alarga ao longo do tempo, e nos países em desenvolvimento ocorre um processo de crescimento demográfico e de aquisição de novos veículos, além da presença de uma grande frota veicular com idade superior a 10 anos, com uma série de defasagens e manutenções deficientes (LIMA et al., 2003).

O ar, como recurso natural que é, assim como os demais, possui um limite de assimilação, sendo que o extrapolamos cada vez mais, aumentando a concentração de poluentes a níveis ameaçadores à qualidade de vida e ao meio ambiente. Em contato com os seres humanos, tais elementos, potencialmente, repercutem em uma série de efeitos deletérios sobre o organismo, em especial sobre o sistema respiratório (PROCÓPIO, 2013).

Devido a diversidade destas substâncias, seus efeitos sobre o meio ambiente, assim como a presença e emissão dessas se apresentam de forma, importância e em magnitudes diversas, a medição sistemática da qualidade do ar é restrita a um número reduzido de

poluentes, em acordo com sua relevância e custo de aferição contínuo. Estas substâncias, definidas de forma universal, são as moléculas: dióxido de enxofre; monóxido de carbono (CO); compostos orgânicos voláteis (COVs); óxidos de nitrogênio (NO_x); oxidantes fotoquímicos, tais quais o ozônio (O₃), e Material Particulado. Eventualmente, outros elementos podem ser adicionalmente monitorados a depender da agência ambiental e de decretos e/ou leis próprias (CETESB, 2021).

Segundo WHO (2022), esta poluição atmosférica pode ser proveniente tanto de ambientes internos como externos, via agentes físicos, químicos e biológicos que modifiquem as características naturais da atmosfera. As fontes dessas emissões, que se apresentam de forma destacada, são: aparelhos que funcionam a base de combustão no interior das residências, como fogões; veículos motorizados; indústrias; queimadas florestais e de resíduos ou rejeitos. Estes resultam em uma série de doenças respiratórias entre outras, sendo uma importante fonte de mortalidade e adoecimento da população.

Consoante ao presente órgão e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2022), mais de 7 milhões de pessoas ao redor do mundo morrem anualmente devido aos efeitos da poluição do ar, e praticamente toda a população mundial (99%) vive sob condições que inalam poluentes atmosféricos acima dos limites recomendados pela WHO *guideline limits*, sendo a situação mais degradante encontrada em países onde predomina uma população com baixa ou média renda. Os maiores riscos de mortalidade proveniente destes advêm da ocorrência de derrames, doenças do coração, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), câncer de pulmão e infecções respiratórias. Destas inúmeras mortes prematuras, 4,2 milhões provêm da poluição externa e aproximadamente 3,8 milhões como resultante da exposição em ambientes internos, totalizando uma a cada nove mortes no mundo.

A NASA (2022) também reafirma o impacto de tal cenário sobre a produção agrícola, na qual as perdas econômicas referentes às colheitas ao redor do mundo são significativas, em especial sobre as plantações de milho, trigo e soja, com estimativas de perdas na ordem de 11 bilhões a 18 bilhões de dólares anuais. Com a maior perda projetada nos Estados Unidos (3,1 bilhões de dólares anuais).

A poluição atmosférica, como relata a *European Environment Agency* (EEA, 2020), possibilita uma série de alterações do equilíbrio ambiental, levando a eventos, como: a acidificação de solos e mananciais de águas, devido a deposição em excesso de substâncias ácidas contendo componentes sulfurosos e nitrogenados, como a chuva ácida; e a eutrofização, consoante ao aumento da deposição de nutrientes nos ecossistemas e a

proliferação, conseqüentemente, desenfreada de microrganismos, reduzindo o oxigênio disponível nos corpos de água para a respiração de seres aeróbicos.

Outros efeitos ainda advêm de tais componentes, e merecem destaque, como relatado pelo *Natural Resources Defense Council* (NRDC, 2021), sendo o caso do aquecimento global. Além de provocarem o fenômeno citado, o exacerbam, em um ciclo de retroalimentação destrutivo. Moléculas de gás carbônico, metano e outros agentes capazes de reter calor são liberados via emissão de poluentes, os injetando em excesso no meio ambiente, que por sua vez levam ao derretimento de geleiras, aumento de focos de incêndios e a evaporação de água, que respectivamente promovem uma diminuição do albedo e maiores taxas de emissões de gases de efeito estufa, e assim adiante. O número de gases tóxicos emitidos de forma antrópica e prejudicial à saúde são enormes, sendo que mais de 200 destes são regulados por leis nos Estados Unidos.

Seus efeitos à saúde são diversos, dependendo do tempo, intensidade e do material, assim como da saúde individual do indivíduo exposto e de suas exposições prévias e cumulativas. Para tanto, apresenta-se a seguir uma caracterização dos seis principais, definidos de forma universal, para a caracterização da qualidade do ar, como mencionado anteriormente.

O dióxido de enxofre, em vista ao informado pelo *New South Wales Government* (NSW Government, 2021) é um gás caracterizado por ser extremamente reativo e apresentar um cheiro forte enjoativo. Sua origem antrópica está atrelada a queima de combustíveis fósseis em plantas energéticas e em atividades industriais. Como fonte natural, temos processos de decomposição e queima de matéria orgânica, erupções vulcânicas e sprays marinhos. Seus impactos, quando de exposição a este, estão atrelados a irritação da mucosa nasal, da garganta e pulmões, potencializando problemas respiratórios pré-existentes, especialmente a asma, e problemas cardiovasculares.

O mesmo também pode reagir com outras substâncias presentes no ar, dando origem a partículas de outros óxidos sulfúricos (SO_x), reduzindo a visibilidade atmosférica com a formação de neblinas. Estes últimos, por sua vez, podem contribuir para a formação da poluição de Material Particulado. Também contribuem na agressão e corrosão da folhagem das plantas, reduzindo seu crescimento, e na formação de chuvas ácidas, desregulando ecossistemas (EPA, 2021).

O monóxido de carbono é um gás que tem origem na queima incompleta dos combustíveis fósseis, sendo emitido principalmente pela queima de combustíveis de veículos e por operações industriais, mas presente junto a incêndios florestais. Devido a sua principal

fonte ser a atividade de veículos, o mesmo é encontrado em maiores concentrações nas cidades, principalmente na presença de intenso tráfego veicular. Em ambientes internos, este é liberado perante o uso de aquecedores a gás não ventilados, aquecedores baseados na queima de biomassa e na fumaça do cigarro. De forma geral, seus níveis de concentração são maiores em períodos de inverno, como consequência de temperaturas mais frias levarem a uma combustão mais incompleta e prenderem os poluentes mais próximos à superfície (CETESB, 2021; NSW GOVERNMENT, 2021).

Seus efeitos à saúde estão envolvidos no fato que sua inalação promove sua ligação preferencial com os glóbulos vermelhos, levando a uma queda de oxigênio disponível para os órgãos, e em casos extremos, ocasionando a morte por envenenamento. Sintomas de intoxicação pelo mesmo, são: dores de cabeça, tontura, náusea, fadiga, dores no peito, perda de visão e efeitos na saúde em bebês em gestação (NSW GOVERNMENT, 2021).

Os compostos orgânicos voláteis são gases, e ou vapores, eliminados da queima parcial dos combustíveis fósseis e outros produtos orgânicos, assim como de suas evaporações, sendo emitidos por atividades que os utilizam, assim como em processos de manejo, transferência e armazenamento. Seu escape para a atmosfera, se mediante a presença de outras substâncias, pode levar a formação de óxidos de nitrogênio, sendo o O₃ o principal deles (CETESB, 2021).

Dentre os COVs presentes em áreas urbanas, destacam-se os compostos aromáticos monocíclicos, como: benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos. Segundo a *Natural Resources Defense Council* (2021), seus efeitos à saúde são diversos e estão presentes em vários destes núcleos, podendo causar: irritação dos olhos, pele e pulmões, em um curto período de tempo, além de desordens sanguíneas. Alguns deles são inclusive considerados agentes carcinogênicos, tal qual a benzina.

Já os óxidos de nitrogênio, em conformidade com o *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC, 2021), são uma mistura de gases composta de oxigênio e nitrogênio, onde os dois principais tipos são o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). Estas substâncias são liberadas para a atmosfera mediante processos de combustão, como: pela exaustão de veículos motorizados; queima de carvão, de óleo e gás natural; soldagem a arco; galvanoplastia; gravação de materiais e explosões a dinamite. Similarmente, são produzidos para a utilização na fabricação de uma série de produtos e componentes químicos, tais quais: combustíveis para foguetes espaciais e explosivos.

Assim como os COVs, nos centros urbanos a maior parcela, frequentemente, se deve a emissão dos veículos e reage na presença da radiação solar para a formação de oxidantes

fotoquímicos, que nem o ozônio, e contribui igualmente para a formação de poluentes do tipo Material Particulado. Quando em elevadas concentrações, o dióxido de nitrogênio pode causar uma série de problemas de saúde, principalmente relacionados ao trato respiratório (CDC, 2021).

O ozônio, no que lhe concerne, é um gás de grande importância para a manutenção da vida como a conhecemos, pois é ele que forma uma camada protetiva que nos resguarda da maior parte dos raios ultravioletas emitidos pelo sol. Ele, quando de sua forma benéfica, encontra-se presente na atmosfera superior, na camada atmosférica da estratosfera, a cerca de 25 km de altitude, formando a camada de ozônio, que inclusive já foi parcialmente destruída devido a emissão de componentes químicos via antrópica, levando a formação dos conhecidos buracos. O problema assenta na sua presença na superfície, se tornando um agente tóxico para a população e meio ambiente, convertendo-se no principal ingrediente do *smog*, conhecido também como névoa ou *smog* fotoquímico (EPA, 2021).

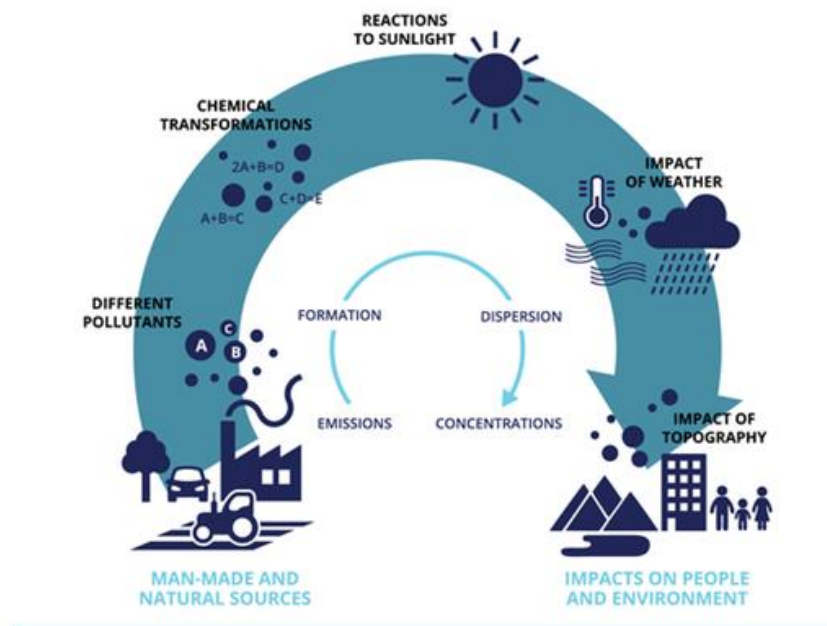
Este poluente, em conformidade com a EPA (2021), não é emitido de forma direta via antrópica, todavia, forma-se de maneira secundária pela reação de óxidos de nitrogênio e os componentes orgânicos voláteis. Essa reação é catalisada pela presença da luz solar, logo sua formação e concentração tende a se apresentar de maneira mais intensa em dias de céu limpo de verão e em zonas urbanas, podendo ser transportado por longas distâncias mediante a presença de ventos. O O₃ “ruim”, ou seja, formado em baixa atmosfera, é danoso à saúde humana, causando complicações principalmente em asmáticos, além de gerar vermelhidão nos olhos, dificuldades respiratórias, tosse e lesões pulmonares. É também prejudicial em elevadas concentrações para vegetações e ecossistemas mais sensíveis.

Por fim, o Material Particulado como classe no qual se encontra inserido nosso objeto de estudo (MP₁₀), será abordado de forma detalhada e específica em capítulo próprio. Como evidenciado ao longo do texto, os poluentes podem ser ejetados na atmosfera mantendo as mesmas propriedades físico-químicas de quando produzidos e/ou reagirem com outras substâncias presentes no ar naturalmente, ou ainda com outros poluentes e constituintes, concebendo novos poluentes e substâncias que potencialmente podem ser mais prejudiciais à saúde e ao meio ambiente que os originais e ainda reagirem para formarem novos compostos.

3.3 PADRÃO DE QUALIDADE DO AR

Torres e Martins (2008) reiteram que para a determinação da concentração de um poluente na atmosfera, verifica-se a concentração que este se encontra disponível no ar no qual se encontram os receptores, tendo como atuantes nesse processo, as variáveis: fontes de lançamento, que podem emitir volumes, concentrações de poluentes e modalidades diferentes ao longo do tempo e podem se encontrar fixas ou deslocarem-se no espaço; e as interações atmosféricas, que podem se dar via processos físicos de diluição ou químicos de reação e transformação dos compostos, com fatores climáticos tendo um papel preponderante. Logo, mesmo sob as mesmas condições de emissão, a qualidade do ar pode apresentar variações significativas nos quais os receptores estão sujeitos. O Esquema 1 ilustra a situação.

Esquema 1 – Possíveis processos envolvidos entre a emissão dos poluentes e o impacto nos receptores



Fonte: EEA *SIGNALS* (2013) apud EEA (2020)

A CETESB (2021) ainda informa que é essa interação, entre as fontes de poluição e a atmosfera, que define a qualidade do ar em determinada localidade, variando no tempo e no espaço, visto que as variáveis modificam-se quanto à essas mesmas grandezas. Esta está sujeita, concomitantemente, a mecanismos de dispersão, produção e remoção, que por sua vez determinam os efeitos adversos sobre os receptores. Outros fatores a se considerar, e que implicam na modificação dos mecanismos, são as características geográficas do sítio, como: relevo, uso e ocupação do solo e a densidade populacional, pois é sabido que modificam os mecanismos de circulação do ar, que por sua vez alteram a extensão e concentração da pluma

de poluição, que pode durar de horas a dias a depender do sistema atmosférico operante (MIRANDA et al., 2017).

Cabe aqui, perante ao exposto, fazer a definição de padrão de qualidade do ar, que é entendido em conformidade com a Resolução CONAMA, nº 491, de 19 de novembro de 2018

Um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica. (BRASIL, 2018, Art. 2. § II).

4 O MATERIAL PARTICULADO

Dentre os poluentes de destaque na avaliação da qualidade do ar, no qual os receptores estão inseridos, sendo utilizado inclusive como parâmetro de avaliação do mesmo pelas agências ambientais e adotado de forma universal, encontra-se o MP. Para Silva (2008), são nas áreas metropolitanas que o problema de poluição do ar por este componente tem representado uma das mais graves ameaças a qualidade de vida da população, sendo ele um dos dois contaminantes atmosféricos que mais geram preocupação em relação a saúde humana e a demais danos, sendo o outro o ozônio.

Este, conforma a EPA (2021), pode ser definido como um conjunto de poluentes formados por uma mistura complexa de partículas líquidas e sólidas (aerossóis), podendo ser constituído por poeira, fumaça, fuligem, sujeira e todo tipo de material capaz de se manter suspenso na atmosfera devido seu tamanho reduzido. Como resultado, obtém-se partículas que apresentam diversos tamanhos, formas e centenas de diferentes componentes químicos, com algumas destas podendo ser visíveis a olho nu, enquanto outras são passíveis de observação mediante o uso de microscópio eletrônico.

Conforme destaca a WHO *global air quality guidelines* (2021), sua presença tanto em ambientes urbanos, e mesmo nas áreas rurais, traz uma série de riscos mediante a sua exposição, que podem ser difíceis de se estimar visto a sua heterogeneidade de composição, formação, origem e sua variação em tamanho, além de outras características físicas, que resultam em potenciais efeitos adversos diferentes. Inclusive, o MP, em sua maior parte, se origina na atmosfera devido a resultados de reações complexas de diferentes poluentes químicos, tendo como exemplo a reação entre o dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, que por si só já são prejudiciais, nos quais são ejetados na atmosfera por atividades industriais, matrizes energéticas e automóveis.

Sua concentração ambiental depende, principalmente, do tamanho da população, das configurações geográficas nas quais a região está inserida, as condições do tempo e as atividades humanas desenvolvidas. Constata-se, por estudos, que em grandes centros urbanos há um predomínio de MP decorrente da queima de matéria orgânica e ressuspensão do solo (SANTOS; REBOITA; CARVALHO, 2018). Entre seus efeitos deletérios, o mesmo em altas concentrações interfere na: visibilidade, incidência da radiação solar a atingir a superfície terrestre, formação de nuvens e causam uma série de efeitos lesivos na saúde humana, em especial no sistema respiratório, tendendo a agravar a situação quanto menor as partículas (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Quanto a sua composição, esta depende principalmente da constituição referente a área geológica no qual se desenvolve as atividades antrópicas e/ou o objeto em processo de intervenção. Usualmente, os constituintes principais se dão por: óxidos de alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca), titânio (Ti), ferro (Fe), entre outros óxidos metálicos. Se faz presente, paralelamente, uma série de compostos químicos orgânicos, via biogênica ou mesmo derivados de processos de combustão de biomassa, ou ainda de compostos inorgânicos, tais quais: sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-) e amônia (NH_3) (MIMURA, 2017).

Apesar deste cenário de gravidade exposto, devido as concentrações elevadas do Material Particulado, em conformidade com a WHO *global air quality guidelines* (2021), sua média de concentração, assim como de outros poluentes, a se saber o O_3 , rompem em um movimento de adição acelerado, à semelhança das fontes de emissão e de sua participação entre os poluentes do ar como fonte de doenças. E a despeito desta situação ter principiado um aumento no número e nas regiões monitoradas a nível global, estas se apresentam de forma insuficiente e dispersas, tendendo a ocorrer de forma devida somente nas nações mais socialmente desenvolvidas, economicamente ricas e nas suas cidades maiores.

O déficit aqui exposto identifica-se por dois mecanismos, sendo o primeiro por uma cobertura de rede inadequada, em outros termos, países que não contam com tais estações, e muitos dos que contam, o possuem apenas nos maiores centros, deixando de fora as populações que residem em zonas rurais e em menores cidades. O segundo mecanismo, pelo qual ocorre essa deficiência, é um monitoramento insuficiente para detectar a variação espacial do MP dentro das cidades monitoradas, impossibilitando uma caracterização detalhada do cenário urbano e da exposição nos quais os agentes receptores estão expostos, dado que sua concentração pode variar significativamente na ordem de centenas de metros (WHO *GLOBAL AIR QUALITY GUIDELINES*, 2021).

A NASA (2022) inclusive declara a importância de realizar o monitoramento da concentração deste elemento, em especial das modalidades menores, assim como de outros poluentes, para promover uma estratégia adequada de planejamento, intervenção e mitigação, até porque sua origem pode se dar de forma direta, com a emissão na atmosfera, ou como produto da reação de poluentes gasosos liberados no meio e que geram particulados.

Assim, tanto medidas que propiciem a diminuição destes lançamentos, como as que permitam um monitoramento adequado e de forma eficiente, dependem da implementação de um sistema satisfatório, abrangente e de qualidade para propiciar uma exposição dentro dos limites legais e sem maiores prejuízos para os cidadãos. Propiciando assim, aos gestores, as informações necessárias para seu devido controle em concentrações seguras e fornecendo

dados para o cálculo de riscos e desfechos a saúde da população local. Viabiliza também, a última, a ter conhecimento da situação que se impera e adote os devidos cuidados (COUTO et al., 2020).

Esse material ainda pode ser subdividido em uma série de classes, como: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP_{10}), Partículas Inaláveis Finas ($MP_{2,5}$) e Fumaça, com tamanhos que podem variar de poucos nanômetros até 100 micrômetros, representando riscos ao desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares (CETESB, 2021; EPA, 2021; SOUZA et al., 2021).

4.1 CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

A atmosfera se caracteriza por ser um meio contínuo e sem fronteiras, onde não é possível exercer um controle direto sobre ela e de seu fluxo, ou seja, ações pontuais ou cometidas por determinadas localidades, que promovam a poluição neste meio, podem ocasionar impactos que ultrapassem as conhecidas fronteiras políticas e geográficas, a depender das variáveis meteorológicas e de suas influências sobre processos de transporte, dispersão, reações físico-químicas e mecanismos que atuem como sumidouros. O cenário exposto é deteriorado ainda mais em razão do uso de tecnologias obsoletas e não ambientalmente adequadas (AZEVEDO, 2010).

Conforme afere Brito, Sodré e Almeida (2018), o MP é um componente minoritário atmosférico, estando ao longo do tempo sempre presente. Todavia, com o desenvolvimento tecnológico, uma expansão dos processos industriais e de queima de combustíveis fósseis transcorreram-se, e sua emissão aumentou de forma exponencial, atingindo muitas vezes níveis prejudiciais. Suas características, como origem de fontes naturais ou antrópicas, e até mesmo quanto a atividades específicas dentro de cada uma dessas classes, estão refletidas em sua composição. Tal fenômeno possibilita o reconhecimento das fontes poluidoras através da identificação de substâncias químicas e demais elementos na sua composição e a adoção de medidas contingenciadoras. Seu tamanho correlaciona-se com o seu tempo de permanência em suspensão no ar e ao potencial de penetração no trato respiratório humano, por exemplo.

Dessarte, demonstra-se que o Material Particulado não constitui uma espécie química definida, e sim um conjunto de partículas com tamanho $\leq 100 \mu\text{m}$, podendo se apresentar nas formas de pó, poeira, fumaça e aerossol, emitidos dos mais diversos modos, tanto no estado sólido ou líquido (TORRES; MARTINS, 2005). Essa variedade presente é muito extensa,

dificultando processos de sistematização e classificação, e para tal, esse constituinte é dividido de algumas formas, a se destacar as que se seguem.

4.1.1 Quanto a Fonte Emissora

Uma das possíveis formas de se classificar os Materiais Particulados se dá em razão dos processos envolvidos nas formas em que estes são ejetados no meio atmosférico, uma vez que podem ser lançados por fontes estacionárias, também comumente chamadas de fixas, ou ainda por fontes móveis. As fontes fixas são aquelas que permanecem de forma imóveis no recinto, isso é, sem alternar de posição ao longo do tempo no espaço, e logo emitem cargas de forma pontual. Seus principais representantes são os processos de combustão, processos advindos de operações industriais e da queima de resíduos sólidos. Como exemplos, podemos citar a queimada de florestas, de pastos, atividades agrícolas, usinas de geração de energia (como termelétricas), aquecedores, emissões vulcânicas, emissão de pólenes pelas flores, aerossóis marinhos, tempestades de areia, dentre outros (PAIXÃO, 2015; PROCÓPIO, 2013).

Por sua vez, as fontes móveis são aquelas atreladas a meios de emissão que se deslocam no espaço, ocupando por consequência, posições variáveis ao longo do espaço em tempos diferentes. Tal movimento sucede na emissão de cargas difusas de poluentes, o que inclusive dificulta o controle dos mesmos. Um seguimento representativo de grande contribuição na carga total destes na nossa atmosfera, são os veículos automotores movidos a derivados de petróleo, principalmente a frota mais antiga e pesada (como caminhões movidos a diesel), além de locomotivas, barcos motorizados, motocicletas e aviões (PAIXÃO, 2015; PROCÓPIO, 2013).

4.1.2 Quanto a Formação

Outra forma de caracterizar e dividir o componente em questão é quanto a sua formação, isto é, se o mesmo se apresenta no meio atmosférico com a mesma composição química na qual foi lançado, ou se passa por processos físico-químicos que alteram sua constituição elementar. Neste aspecto, ele pode ser alocado em duas classes. Como poluente primário, mantendo as mesmas características no ambiente em relação ao momento exato de quando emitido pelas suas fontes, conservando sua configuração original. Podem-se citar como exemplos: poeira do solo, spray marinho, material biológico e poeira vulcânica (PRIOLI, 2016; TORRES; MARTINS, 2005).

Prioli (2016) ressalta que o MP secundário é aquele que é gerado através da reação entre poluentes primários com os gases e/ou partículas menores, naturalmente presentes na atmosfera, ou com outros poluentes, via conversão de gás a partículas, pelos: compostos orgânicos voláteis, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio. Como resultado, obtém-se: nitratos inorgânicos, sulfatos e compostos orgânicos (carbono orgânico). Salienta-se que, para a produção da modalidade secundária, é ainda preciso a presença da radiação solar, agindo como agente catalizador da reação e provendo as reações fotoquímicas necessárias (WHO, 2022).

Seus efeitos sobre a saúde humana e demais agentes receptores são igualmente graves, porém mais complicados de se estimar, quando do segundo caso. Adicionalmente a isto, as maiores concentrações dos poluentes secundários tendem a ocorrer em regiões mais afastadas das fontes de emissão dos compostos que os deram origem, visto que precisam de tempo para formarem, e acabam por se deslocarem nesse período devido a ação de locomoção do ar (PAIXÃO, 2015).

4.1.3 Quanto a Origem

Uma das discussões realizadas, quanto as necessidades presentes e futuras acerca da qualidade ambiental, se diz respeito da presença de elementos presentes no meio ambiente em concentrações superiores as desejáveis. Dentro desse contexto, insere-se também o Material Particulado como um dos poluentes, onde uma das abordagens previstas diz respeito aos processos envolvidos na sua formação, podendo esses se desenvolverem em virtude de ações naturais, ou ainda das ações antrópicas. O problema aqui destacado é que as emissões de MP decorrentes de emissões antrópicas merecem maior atenção, isso pois são potencializadas pelas exalações antrópicas de outros gases, o que resulta potencialmente em elementos reativos entre si e com as substâncias já presentes na atmosfera, alterando o equilíbrio essencial a manutenção da vida (BARBOSA, 2014).

Dessarte, o Material Particulado pode ter origem natural, ou seja, gerado por fenômenos da natureza. Exemplos representativos desse fenômeno, são: a ressuspensão da poeira de superfícies, como do solo, devido a ação do vento; erupções vulcânicas, que emitem materiais particulados, tal qual SO_2 e sulfeto de hidrogênio (H_2S); processos biológicos envolvendo o metabolismo de microrganismos; aerossóis biogênicos, como pólen, vírus e bactérias; fotossíntese; erosão eólica; incêndios naturais e aerossóis marinhos. Esta categoria

tende a apresentar a mesma composição de seu material de origem (MIMURA, 2017; SANTOS et al., 2019).

No tocante a origem antrópica, a mesma está atrelada a emissão de MP que provém de atividades desenvolvidas pela intervenção do ser humano, ou ainda, as que ocorrem naturalmente, mas são intensificadas pela sua intervenção. Neste aspecto, estão inseridas as atividades industriais de forma geral, tais quais: das indústrias petroquímicas, de galvanoplastia, de base, extração e mineração; práticas agrícolas, como aplicação e pulverização de fertilizantes e pesticidas; incineração de resíduos e rejeitos como forma de destinação final; o tráfego automotivo e a liberação de MP pela combustão incompleta pelos escapamentos; o desgaste de materiais, como pneus, pelo atrito com o solo; queimadas provocadas pelo homem e geração de energia elétrica alicerçada em matrizes energéticas a base de carvão, entre outras. Em ambos os casos, independente da origem, o Material Particulado pode ser também enquadrado como de fonte fixa ou móvel, tal como fica evidenciado na Figura 3 (MIMURA, 2017; TORRES; MARTINS, 2008).

Figura 3 – Fontes fixas e móveis de Material Particulado de origem antrópica



Fonte: CDC (2021)

De acordo com a WHO *global air quality guidelines* (2021), além de sua origem poder ser de forma natural ou antrópica, esta última se tornou a forma dominante nos centros urbanos desde o advento das Revoluções Industriais, e vem aumentando, com o processo de combustão sendo o maior contribuidor, de forma particular, as ações de queima de combustíveis fósseis e biomassa para se obter energia. Sua origem pode se dar em ambientes internos e externos, sendo que referente ao primeiro, os principais meios de geração se dão

pelos aquecedores a base de combustíveis, fogões (a carvão, lenha e estrume), cigarros e outros tipos de combustão.

Quanto a sua origem externa, essa se dá principalmente por meios de transporte, indústrias de geração de energia e queima de biomassa, além da contribuição das fontes internas, da ressuspensão de poeiras e das partículas geradas por obras e atividades de construção civil. Devido a capacidade de transporte a longas distâncias do MP, pela atmosfera, todas estas atividades contribuem para a deterioração da qualidade do ar das cidades e até de outras regiões mais afastadas (EEA, 2020).

4.1.4 Quanto ao Tamanho

Como já exposto anteriormente, o Material Particulado configura-se por ser uma mistura com características complexas, estando presente e tendo origem em ambientes rurais, naturais e urbanos, onde seus componentes detêm uma diversa composição física e química, reagindo de diversas formas. Seus riscos aos receptores estão atrelados a várias das classificações citadas, onde uma das principais refere-se ao seu tamanho. De forma ampla, tem-se que seu tamanho está atrelado a distintos efeitos a saúde, onde de forma geral, quanto menor o mesmo, mais profundamente ele se deposita nas vias aéreas, resultando em maiores complicações. Outro viés, que demonstra a importância desta forma de categorização, é que sua dimensão implica diretamente nos processos envolvidos no transporte, remoção e deposição nas superfícies e no ar. Assim, esta particularidade é um dos parâmetros de mais valia no estudo da qualidade do ar e de seu nível de poluição referente aos aerossóis (WHO *global air quality guidelines*, 2021).

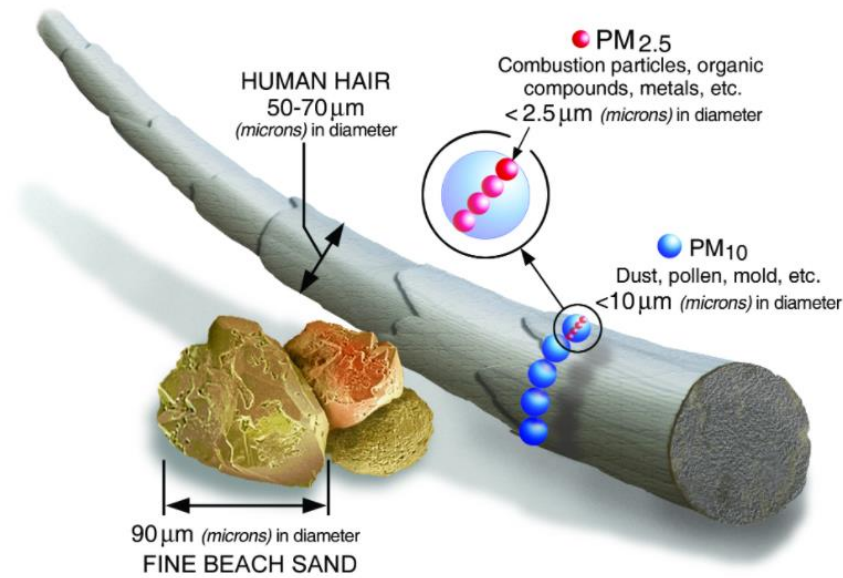
Para este fim, o MP é classificado tendo por base uma aproximação de seu tamanho em relação a uma esfera, recebendo a alcunha de diâmetro aerodinâmico (d_a), sendo esta a unidade de medida de seu tamanho. Esse diâmetro, no qual é classificada a partícula, deve assemelhar-se ao diâmetro de uma esfera de densidade unitária que possui a mesma velocidade de sedimentação da unidade em questão. Isto posto, uma das formas mais usuais e utilizadas para referir-se a uma parcela do MP, servindo como um ponto de corte do tamanho (ou seja, incluindo a dimensão desejada e as inferiores), é composta pela utilização da sigla referente ao termo Material Particulado, acrescida do subscrito numérico representativo do diâmetro de corte (KIM; KABIR, E.; KABIR, S., 2015). Como exemplo, o Material Particulado com $d_a \leq 10 \mu\text{m}$ pode ser optativamente representado por MP₁₀.

Barbosa (2014) cita que, em semelhança aos efeitos dos diâmetros do material na saúde, quanto menor a dimensão da substância em análise, maior sua capacidade de manter-se suspenso na atmosfera por um maior período de tempo, onde em casos extremos, de partículas muito finas, associadas a condições favoráveis topográficas, de emissão e meteorológicas, potencialmente podem atingir regiões remotas e inabitadas, como desertos e polos. No tocante a aferição da concentração de poluentes atmosféricos, de forma geral, segundo a Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018: “Adota-se como unidade de medida de concentração dos poluentes atmosféricos o micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) com exceção do monóxido de carbono que será reportado como partes por milhão (ppm).” (BRASIL, 2018).

Posto isto, tal material possui seu d_a variando entre 0,02 μm até 100 μm . Por sua vez, devido à grande extensão de diâmetros aerodinâmicos possíveis e seus diferentes impactos, o MP pode ser subdividido em algumas classes, a se saber: Partículas Totais em Suspensão, Partículas Inaláveis e Partículas Inaláveis Finas. As PTS, são aquelas que apresentam $d_a \leq 50$ μm , onde suas frações mais finas podem ser inaladas, enquanto as maiores afetam a qualidade de vida da população e o meio ambiente, causando poluição visual, cobrindo superfícies, degradando esteticamente o ambiente, além de se em excesso, cobrir folhagens e prejudicar processos fotossintéticos e o desenvolvimento da vegetação e toda a cadeia alimentar, desta dependente. Eram utilizados, em maior escala, na gestão da qualidade do ar anos atrás. Atualmente, são mais usados como parâmetro auxiliar, em condições específicas, devido ao desenvolvimento do conhecimento da área e a verificação da maior importância das partículas menores (CETESB, 2021; EPA, 2021; MUHLFELD et al., 2008).

Por sua vez, as PTS podem ser subdivididas em: Partículas Grossas ($d_a \geq 2,5$ μm) e Partículas Finas ($d_a < 2,5$ μm). Outra denominação de subclasse, e mais usual, é aquela em que a parcela das PTS com $d_a \leq 10$ μm recebe o nome de Material Particulado Inalável, sendo esse o maior responsável dentre todo o MP por interferir na qualidade do ar de zonas urbanas, consistindo no mais utilizado, entre essas, na averiguação das condições atmosféricas no tocante a sua qualidade. Este último, por sua vez, devido sua importância e possível nível de penetração no trato respiratório, se subdivide em Moda Fina ($d_a \leq 2,5$ μm) e Moda Grossa ($d_a > 2,5$ e ≤ 10 μm). A Moda Fina também pode ser denominada por Partículas Respiráveis (BAIRD; CANN, 2011; MUHLFELD et al., 2008). Faz-se presente também, apesar de menos conhecida, a fração de Partículas Ultrafinas ($\text{MP}_{0,1}$), ou seja, com $d_a \leq 0,1$ μm (PRIOLI, 2016). Para uma melhor visualização, a Figura 3 ilustra diferentes tamanhos de MP, o comparando com elementos conhecidos comumente.

Figura 4 – Diferentes diâmetros de MP



Fonte: EPA (2021)

Segundo constatam Guerra e Miranda (2011), as Partículas Inaláveis atuam como catalizadoras em reações químicas entre os poluentes atmosféricos, interagindo com os poluentes primários e os modificando, dando origem a poluentes secundários mais deletérios, como substâncias cancerígenas. Seus efeitos ambientais se mostram presentes juntamente as condições meteorológicas, na medida em que têm potencial de reduzir a visibilidade; alterar os padrões de absorção e dispersão de luz; reagir com outros componentes, formando nevoeiros; e até tornar o céu avermelhado ao nascer e pôr do sol, devido a alteração dos padrões de absorção e reflexão de comprimentos de onda de luz solar.

No tocante a origem destas diferentes modalidades de diâmetros aerodinâmicos, Prioli (2016) e Barbosa (2014) afirmam que as Partículas Grossas originam-se majoritariamente da ação de ressuspensão do solo, e devido seu tamanho superior aos demais, tendem a se assentarem na superfície após alguns minutos e até mesmo segundos. O MP₁₀ tem como principal fonte de contribuição as ações que geram partículas por formas mecânicas, ao caráter de: atividades de construção, processos de atrito entre materiais, elementos provenientes da crosta terrestre mediante erosão, mofo, pólen e poeira. Tendem a permanecer em suspensão na atmosfera por períodos que variam de minutos a horas, e com isso estão aptos a serem transportadas por dezenas de quilômetros de distância.

O MP_{2,5} possui como agente contribuinte principal: a queima incompleta de combustíveis fósseis, que pode advir de matrizes energéticas, veículos de transporte, indústrias e queimadas em geral; compostos orgânicos e metais. O mesmo se dá no caso das

Partículas Ultrafinas. O tempo de permanência, em suspensão, da Moda Fina possui uma amplitude que vai de dias a semanas (até 23 semanas), atingindo potencialmente milhares de quilômetros de distância de suas fontes (MIMURA, 2017).

4.2 IMPACTOS AOS AGENTES RECEPTORES E A ECONOMIA

De acordo com Azevedo (2010), a poluição do ar representa um dos maiores problemas ambientais da atualidade, sendo um dos mais estudados devido aos impactos aos quais estão associados na saúde pública e na qualidade de vida da população. Todavia, repercussões a exposição a tais componentes não são equitativas, e dependem grandemente do nível de desenvolvimento econômico e social dos países, e a consequente importância dada a saúde pública e as legislações regionais referentes aos limites máximos de exposição permitidos.

Viver em ambientes com elevados níveis de poluentes afeta o organismo humano nas mais diversas formas, em especial o sistema respiratório, com impactos mais pronunciados em grupos sociais mais vulneráveis e variando seus sintomas a depender do indivíduo, de suas condições de saúde, predisposições genéticas e características do poluente. Entre as repercussões mais conhecidas, têm-se: a alteração da frequência cardíaca, da pressão sanguínea, tônus vascular, tempo de coagulação sanguínea e desenvolvimento de arteriosclerose (AZEVEDO, 2010; WHO *GLOBAL AIR QUALITY GUIDELINES*, 2021).

No tocante a mortalidade provocada pela contaminação do ar, a *WHO global air quality guidelines* (2021) aponta que aproximadamente 9 milhões de pessoas morrem anualmente, somente em decorrência deste fator, e há uma perda de vários anos de vida, de qualidade, para centenas de milhões de pessoas, majoritariamente em países de baixo e médio desenvolvimento econômico. Adicionalmente, configura-se dentro das 5 maiores causas de doenças, dentre 87, em uma avaliação global em conjunto com fatores, como: o uso de cigarro. Outra repercussão se dá pelo meio dos custos econômicos relacionados a saúde, sendo que a nível global, as perdas giram em torno de 143 bilhões de dólares por falta ao trabalho e 3,55 trilhões de dólares devido à perda de produtividade devido à queda da saúde, considerando apenas o poluente $MP_{2,5}$ (WORLD BANK, 2016).

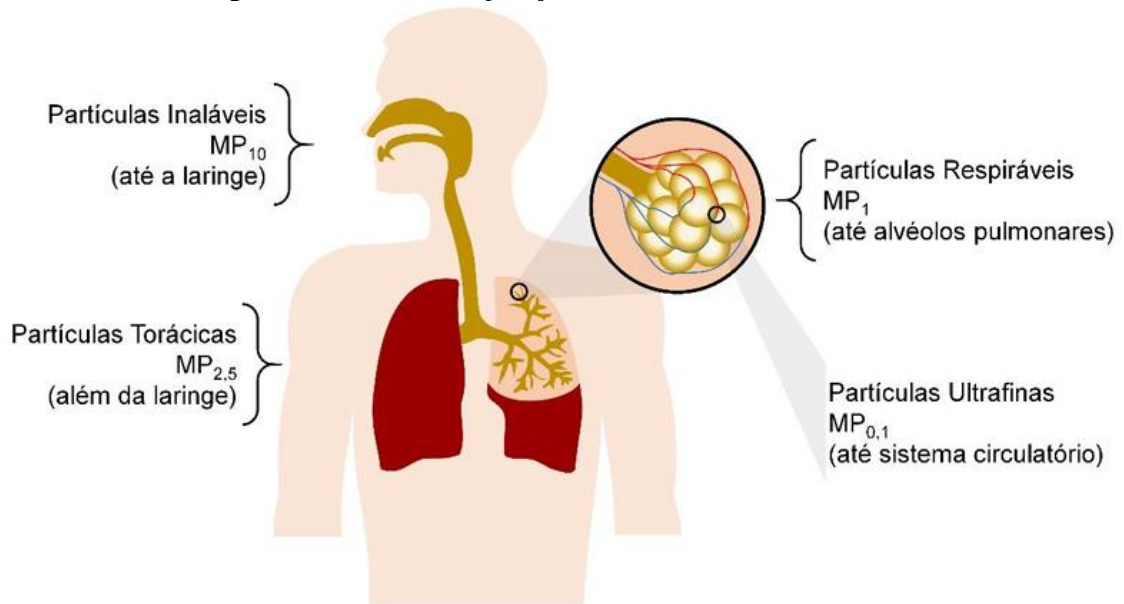
Adicionais efeitos podem ser observados decorrentes de tais processos, como redução da produção agrícola, danos florestais, deterioração de obras de arte e construções, além da contaminação dos recursos hídricos, alimentos e solos (QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007). Estima-se que, atualmente, as perdas sobre as atividades agrícolas de colheita de

milho, soja e trigo giram em torno de 11 bilhões a 18 bilhões de dólares anuais, enquanto praticamente toda a população mundial (99%) vive sob condições que inalam poluentes atmosféricos acima dos limites recomendados pela WHO *guideline limits*, sendo a situação mais degradante encontrada em países onde predomina uma população com baixa ou média renda (NASA, 2022).

Dentre estes, encontra-se a classe de poluentes denominada de Material Particulado. É informado pelo Laboratório de Climatologia e Análise Ambiental (LabCAA, 2002), que até o ano de 1989 a legislação nacional não preocupava-se com as suas modalidades, o considerando apenas no todo para fins de avaliação da qualidade ambiental. Não obstante, estudos ao longo das últimas décadas provaram que as partículas mais finas, especialmente as denominadas MP_{10} , são as de maior importância, em decorrência de seu maior potencial de impacto na saúde e nível de penetração no trato respiratório. Usualmente, partículas maiores que 10 micrômetros são retidas pelas defesas do organismo, como mucosas das cavidades nasais e seus pelos, contudo, as de modalidades mais finas costumam ultrapassar essas barreiras e conseqüentemente provocam irritação na garganta, nos olhos, reduzem o sistema imunológico, provocam doenças crônicas e podem penetrar a níveis tão profundos que atingem os pulmões e seus alvéolos pulmonares, possibilitando neste último caso que adentrem a corrente sanguínea e transportem substâncias tóxicas e cancerígenas.

Logo, quanto menor seu d_a , maior o seu alcance no interior das vias aéreas. Como resultado destas características, é que o MP_{10} recebe o nome de Partículas Inaláveis. As partículas representantes da Moda Grossa, nessa categoria, ultrapassam as cavidades orais e nasais e se alojam na laringe, enquanto a Moda Fina avança até atingir os pulmões. A fração composta pelos $MP_{1,0}$ tem a capacidade de se alojar no interior dos alvéolos pulmonares. Por fim, as Ultrafinas conseguem, além de se estabelecer nos alvéolos, os ultrapassar e atingir a corrente sanguínea, se espalhando ao longo de todo o corpo pelo sistema circulatório (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018). Todo esse processo descrito pode ser visualizado pela Figura 5 a seguir.

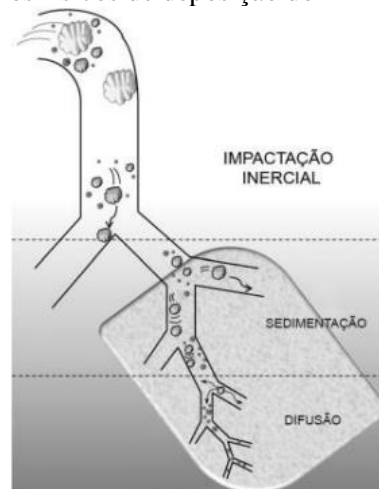
Figura 5 – Níveis de Deposição do MP de acordo com seu d_a



Fonte: BRITO; SODRÉ; ALMEIDA (2018)

Barbosa (2014) informa que as partículas com diâmetro aerodinâmico $\geq 5 \mu\text{m}$ usualmente, apesar de penetrarem pelas vias aéreas superiores (se $d_a \leq 10 \mu\text{m}$), são removidas do sistema pelos seus próprios movimentos, posto que sofrem um mecanismo de impactação com as mucosas. As que possuem dimensões entre $1 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$, passam pelo processo físico de sedimentação, nas vias aéreas intermediárias, atingindo os brônquios terminais. Por último, o MP_{1,0}, eventualmente, chega ao interior dos alvéolos pulmonares e sofre o processo de difusão, ou seja, troca de substâncias a níveis moleculares, podendo liberar compostos na corrente sanguínea e participar de trocas gasosas. A Figura 6 representa os processos.

Figura 6 – Mecanismos físicos de deposição do MP no sistema respiratório



Fonte: STRANGER (2005) apud BARBOSA (2014)

A presença, em níveis elevados, de Material Particulado Inalável na atmosfera, impacta também a população mediante trajetórias diretas, seja pela já citada inalação, ou por meios indiretos, visto que o ser humano e animais podem ser expostos, ao poluente estudado, com o consumo de água, alimentos e contato com solos contaminados com ele, ou até mesmo pela sua deposição na pele, viabilizando sua absorção. Em todos os casos, os grupos mais vulneráveis são compostos por: crianças, idosos, indivíduos previamente doentes e fragilizados, mulheres grávidas e especialmente enfermos com doenças cardiovasculares e do sistema respiratório. Todo caso, o tamanho da partícula também tem papel fundamental na gravidade, assim como sua composição (MIMURA, 2017).

A exposição a particulados maiores está associada a processos alérgicos, de irritação nos olhos, nariz e garganta. As doenças passíveis de se desenvolverem e agravarem quando da exposição a elevados níveis da Moda Grossa do MP_{10} , são: asma, bronquite, pneumonia e enfisema, de maneira que acarretam na sobrecarga e gastos hospitalares, ademais de impulsionar as taxas de mortalidade. Tem um potencial patogênico relevante e preponderante em regiões secas e áridas, estando associada a mortalidade de causa cardiovascular. Outro ponto crucial, quanto aos impactos, estende-se a exposição a tais constituintes, podendo ser dividida em três domínios: exposição ao longo da vida, exposição de longo período e exposição de curto prazo (MIRANDA et al., 2017; WHO *GLOBAL AIR QUALITY GUIDELINES*, 2021).

O primeiro refere-se ao contato ao longo dos vários anos, em vários ambientes, sendo de particular importância quando de elementos carcinogênicos; o segundo comporta um prazo de um ou alguns anos, estando relacionado a redução da função pulmonar, desenvolvimento de bronquite crônica e morte prematura; e o último a um período de minutos a dias, com potencial de agravar doenças pulmonares, originando e intensificando crises de asma, bronquite crônica, morte prematura e eventos de arritmia e ataques cardíacos em cardíacos. São também mais susceptíveis os portadores de doença da artéria coronariana, doença pulmonar obstrutiva crônica e diabetes (devido a propensão a doenças cardiovasculares) (EPA, 2021).

Couto et al. (2020), informam que a exposição ao $MP_{2,5}$ apresenta implicações muito mais graves a saúde, pois penetra profundamente e o organismo não possui mecanismos satisfatórios que permitam sua remoção. A exposição a tal fração está vinculada a processos inflamatórios do trato respiratório, pioras nos sintomas asmáticos e da DPOC, surgimento de tumores malignos pulmonares, declínio da capacidade respiratória, infarto isquêmico do

miocárdio e acidente vascular cerebral. Promove, adicionalmente, problemas de desenvolvimento fetal em gestantes e de desenvolvimento pulmonar em crianças.

Alguns estudos sugerem relação à exposição ao $MP_{2,5}$ e o desenvolvimento de diabetes tipo II, partos prematuros, bebês recém-nascidos abaixo do peso ideal e doenças mutagênicas. Conforme informe do *Health Effects Institute* (HEI, 2018, apud Couto et al., 2020), no ano de 2016, a Moda Fina foi a 6^a maior causa de morte prematura no mundo, levando 4 milhões de pessoas a falecerem, contribuindo em maior grau que o consumo de álcool e sódio, em excesso. No Brasil, no ano de 2017, estima-se que vieram a óbito 50.300 pessoas.

Outra característica, desta modalidade, é que partículas diminutas tendem a ser constituídas por elementos e compostos de maior toxicidade, já que grande parcela advém de reações químicas, e possui maior capacidade de ampliar seu poder tóxico, devido a uma maior reatividade com gases presentes no ar, assim como ampliando os efeitos fisiológicos dos últimos. A título de exemplo, podem-se ter aderidos a esta fração: compostos sulfatados, que incitam a inflamação das vias aéreas, devido ao potencial hidrogeniônico ($pH < 1$ (extremamente ácido); e compostos nitrosos, que apresentam alta toxicidade, devido suas elevadas capacidades oxidantes. Pode-se misturar com o SO_2 , ampliando seus efeitos deletérios, quando comparados de forma individual, ou ainda absorvê-lo e, na presença de umidade, formar ácidos. Se for composta por metais pesados, e por adentrar nos sistemas, pode levar a mutações genéticas, bioacumulação e necroses dos tecidos (BARBOSA, 2014).

Cabe destacar que, em valores referentes a 2019, 92% da população mundial encontrava-se vivendo em regiões nas quais os níveis de qualidade do ar, referente a média anual da Moda Fina (valor máximo de $10 \mu g/m^3$, à época), eram extrapolados (SANTOS et al., 2019). Ainda conforme a WHO (2022), esses valores variam substancialmente entre as regiões do mundo, sendo que em 2019, a que contou com o maior índice foi o sudeste asiático, sucedido pelo extremo leste mediterrâneo. O continente africano apresentou, similarmente, taxas altas em alguns de seus países ocidentais, decorrentes, na sua maior parte, das areias e poeiras do Deserto do Saara. Essas, todavia, devido sua natureza, são compreendidas majoritariamente por material da Moda Grossa ou ainda com diâmetros aerodinâmicos superiores.

A presença do Material Particulado na atmosfera causa uma série de impactos, além dos graves prejuízos à saúde humana, atuando também de forma deletéria sobre o meio ambiente, como: na deterioração da vegetação, corrosão de materiais e diminuição da visibilidade. A depender do tempo de exposição ao MP, sua concentração e a frequência do

evento, pode-se obter como resultante uma alteração da vegetação a nível molecular e bioquímico, resultando em danos ecossistêmicos e na cadeia alimentar. Uma das formas da ocorrência destes é provocado pelo entupimento dos estômatos, dificultando o metabolismo e geração de energia vegetal, levando a maiores níveis de consumo de energia e a uma redução da fotossíntese líquida, visto que pode reduzir em até 50% a radiação fotossinteticamente ativa. Conjuntamente, altera as características químicas do solo e suas propriedades nutritivas e ao se depositar sobre as superfícies foliculares, pode desidratá-las. Essa vegetação se torna mais frágil, com menor capacidade de desenvolvimento, mais susceptível ao ataque de pragas e adversidades meteorológicas, como estações secas prolongadas (SMITH, 2012).

Espécies vegetais menos resistentes podem acabar não resistindo, ocasionando o empobrecimento da biodiversidade vegetal, tanto no tocante a variedade de espécies como em sua quantidade. Esse efeito, ao longo do tempo, se propaga por toda a cadeia alimentar e deteriora todo o ecossistema local, reduzindo a biomassa aérea e subterrânea. Outro viés é que o material em questão degrada casas, ruas, superfícies de móveis e objetos, cobrindo-os como “poeira” e podendo causar suas corrosões (TAYLOR; JOHNSON; ANDERSEN, 1994).

Sua presença no ar promove, como informado por Torres e Martins (2005), uma redução da quantidade de radiação solar disponível na superfície, altera a dinâmica atmosférica e incrementa o número de núcleos de condensação, o que acaba por influenciar no: aumento da nebulosidade, volume de precipitação, albedo superficial e ciclos hidrológicos, inclusive alterando o balanço radioativo do planeta, visto que a depender de sua composição e/ou dimensão tende a absorver ou refletir mais a energia solar. Por fim, leva a ocorrência do *smog* fotoquímico. Este fenômeno é caracterizado, previamente, pela presença de outro evento, conhecido como: *smog*. O *smog* é descrito tendo um aspecto de “névoa”, com baixa visibilidade, sendo formado por uma mistura de gases, a se saber: NO_x, COVs, SO₂, aerossóis ácidos, MP e gases.

Condições essas são encontradas preferencialmente em ambientes urbanos, próximos às vias de tráfego intensas e polos industriais, principalmente devido as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis. Tal evento, por si só, já é altamente prejudicial e tóxico aos seres vivos e materiais. Contudo, quando na presença da luz solar, ocorre uma ativação e catalisação da reação entre estes elementos e a formação de poluentes secundários, e passa-se a se chamar de *smog* fotoquímico, com uma ampliação nas suas capacidades degradantes frente ao anterior. Sua principal particularidade é a formação e a presença de ozônio superficial, que é nocivo. Este conjunto de compostos acabam por ser retidos nos particulados, entre eles os cancerígenos, e a depender dos seus diâmetros são inalados até

atingir os alvéolos pulmonares e participam de reações químicas do organismo, desencadeando e agravando patologias. Neste contexto, sua presença acaba por adicionalmente agravar os efeitos de outros gases, como o do dióxido de enxofre, levando aos conhecidos eventos de poluição e mortes críticas com o advento das Revoluções Industriais (TORRES; MARTINS, 2008). A seguir, na Figura 7, um exemplo do evento de *smog* fotoquímico e de sua redução de visibilidade na cidade de Xangai (China).

Foto 1 – Ocorrência de evento de *smog* fotoquímico na cidade de Xangai



Fonte: FRANCO. **Morte no ar**. 27 out. 2015. Disponível em: <https://www.revistaplaneta.com.br/morte-no-ar/>. Acesso em: 15 fev. 2022

Outro ponto impactado pelo MP é a visibilidade, mesmo quando da não presença dos *smogs*, sendo um dos indicadores mais facilmente percebidos pelas pessoas e visualizados quando da poluição do ar, sendo um indicador de interesse. Como a visibilidade é uma variável que depende do espalhamento e absorção das moléculas das partículas e gases da atmosfera e depende também da intensidade da incidência da luz solar, um incremento no seu número e concentração alteram nas características ópticas (espalhamento e absorção) que regem esse sistema. O sucedido é agravado quanto mais finas forem as partículas, visto que a eficiência de espalhamento aumenta proporcionalmente com a redução do d_p , convergindo em valores de: 50% a 70% para o MP entre 2,5 μm e 10 μm e até 90% para o MP entre 0,1 μm e 1,0 μm . E estudos demonstram que a maior contribuição dos poluentes nesse processo se deve ao Material Particulado Inalável (PRIOLI, 2016). Ocasiona-se perdas econômicas, acidentes em estradas, fechamentos de escolas e outros eventos indesejáveis em casos de concentração exacerbados.

4.3 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS

Os elementos meteorológicos são, como mencionado previamente, essenciais para a definição do nível da qualidade do ar no qual os agentes receptores, entre eles o ser humano, estão inseridos e conseqüentemente o nível de sua poluição. Tal feito advém do fato dos fatores que compõe o clima determinarem, em parte, o tempo de permanência dos poluentes no local lançado, suas transformações em componentes secundários e o seu transporte a demais áreas. Genericamente, em condições normais, os poluentes se concentram na baixa troposfera por um intervalo de um mês. Quando atingem a estratosfera, e essa por apresentar um ambiente menos turbulento, perduram em intervalos de dois a três meses e acabam por circular por mais tempo, o que amplia seus impactos ao meio ambiente (GUERRA; MIRANDA, 2011).

Em concordância ao exposto, Monte, Alburqueque e Reisen (2016) afirmam que as principais condições meteorológicas que implicam em um papel fundamental na dispersão ou acumulação dos poluentes, entre eles o Material Particulado, são: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e a precipitação atmosférica. Ou seja, a dispersão dos poluentes depende da turbulência da atmosfera em que estão inseridos. A topografia e a estrutura urbana contam com um papel ponderoso na variável vento. Sua velocidade tende a subir na baixa troposfera, quanto maior a altura em relação ao solo, devido a diminuição da interferência do atrito superficial no fluxo de ar. Assim, muitos de seus processos de remoção e deposição estão atrelados as condições do tempo meteorológico.

Acontece que, como constatado por Lazzari, Camargo, Schneider (2011), a presença de casas, edifícios e o crescente processo de verticalização das cidades, implicam em uma maior resistência em seu fluxo, gerando uma queda da velocidade média dos ventos nos principais polos de produção de poluentes. Fatores topográfico naturais, como: vales, e núcleos urbanos inseridos nestes; e a presença de cadeias de montanhas em suas adjacências, tendem a favorecer a ocorrência de maiores concentrações de poluição atmosférica no ar. Do mesmo modo, a presença e a quantidade de espécies de vegetação e o tipo de uso e ocupação do solo impactam o seu acúmulo.

Essas características e elementos locais possuem a capacidade de alterar o microclima de determinadas localidades, gerando fenômenos como a ilha de calor e a inversão térmica, onde em ambos os casos, promovem uma maior deterioração dos índices de qualidade do ar, já que o clima local formado, em oposição as zonas circundantes, dificultam a dispersão dos poluentes e os concentram (GUERRA; MIRANDA, 2011).

Perante ao apresentado, para uma melhor compreensão dos processos e meios de deposição, tempo de permanência e de influência na sua concentração, cabe definir o termo clima e seus componentes, na medida em que apresentam grandes contribuições na concentração do Material Particulado e, conseqüentemente, nos impactos deste sobre a saúde das populações e ademais agentes. O clima, segundo a *World Meteorological Organization* (WMO, 2022, tradução nossa), é entendido como

[...] a medição da média e da variabilidade de quantidades relevantes de certas variáveis em determinado local, tais quais: temperatura, precipitação e vento, ao longo de um período de tempo, que pode variar de meses a milhares de milhões de anos. O período clássico é de 30 anos como definido pela Word Meteorological Organization.

Ainda, conforme o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2018), o Tempo Meteorológico é constituído por um conjunto de condições atmosféricas e fenômenos meteorológicos de forma a alterar a superfície e o ecossistema local em uma dada localidade em um curto momento de tempo. Estes Fenômenos são: precipitação, vento, umidade, nebulosidade, nevoeiro e temperatura. Ou seja, estes são os parâmetros do tempo, onde sua variação e estado médio ao longo dos anos dão origem ao clima de determinada região.

4.3.1 Mecanismos de Deposição e Remoção

A remoção de partículas de aerossóis da atmosfera depende de seu diâmetro aerodinâmico, que define os mecanismos mais prováveis de remoção e deposição do MP. Esses mecanismos podem ser denominados como: deposição seca (assentamento), coagulação (nucleação) e deposição úmida. A deposição úmida ainda pode ser subdividida nos processos conhecidos, como: *rainout* ou *washout* (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018). Estes são abordados nas alíneas a seguir:

- a) deposição seca: esse mecanismo é caracterizado pelo assentamento das partículas nas superfícies, como resultado da força de ação da gravidade e sem a presença de precipitação, onde de forma geral, quanto maiores os seus tamanhos, mais velozmente se dão as deposições, que podem ser estimadas com o uso da Lei de Stokes e seus cálculos de velocidade terminal, e depende de variáveis, a se saber: densidade da partícula, do ar, viscosidade do meio, gravidade e o fator de correção de arraste. A

dependem somente deste processo, o $MP_{1,0}$, $MP_{0,1}$ e $MP_{0,002}$, levam respectivamente: 328 dias, 36 anos e 228 anos em média, se localizados a uma altitude de 1 km, para voltarem ao solo. Ao passo que MP_{10} e MP_{100} levam, correspondentemente, um prazo de 3,6 dias e 1,1 hora. A deposição seca é mais representativa para as partículas maiores ou iguais à 50 micrômetros (JACOBSON, 2012);

b) coagulação: esta via ocorre, principalmente e de maneira mais eficiente, em partículas com $d_a \leq 0,01 \mu\text{m}$, isso pois o fenômeno é caracterizado pela agregação de várias partículas finas, resultando em partículas maiores, que aí podem ser eliminadas por meio da deposição seca ou úmida. A dependência de dimensões diminutas advém de sua base ser regida pelo Movimento Browniano, onde a energia cinética, em uma dada temperatura, é maior quanto maior sua dimensão. Isto posto, o $MP_{0,01}$ conta com uma menor chance de ricochetear no choque, promovido pelo Movimento, com os seus semelhantes, facilitando a ocorrência da manutenção dos agregados. Destaca-se, contudo, que tal fenômeno é ainda significativo para as partículas menores que 0,1 micrômetros (MUHFELD et al., 2008);

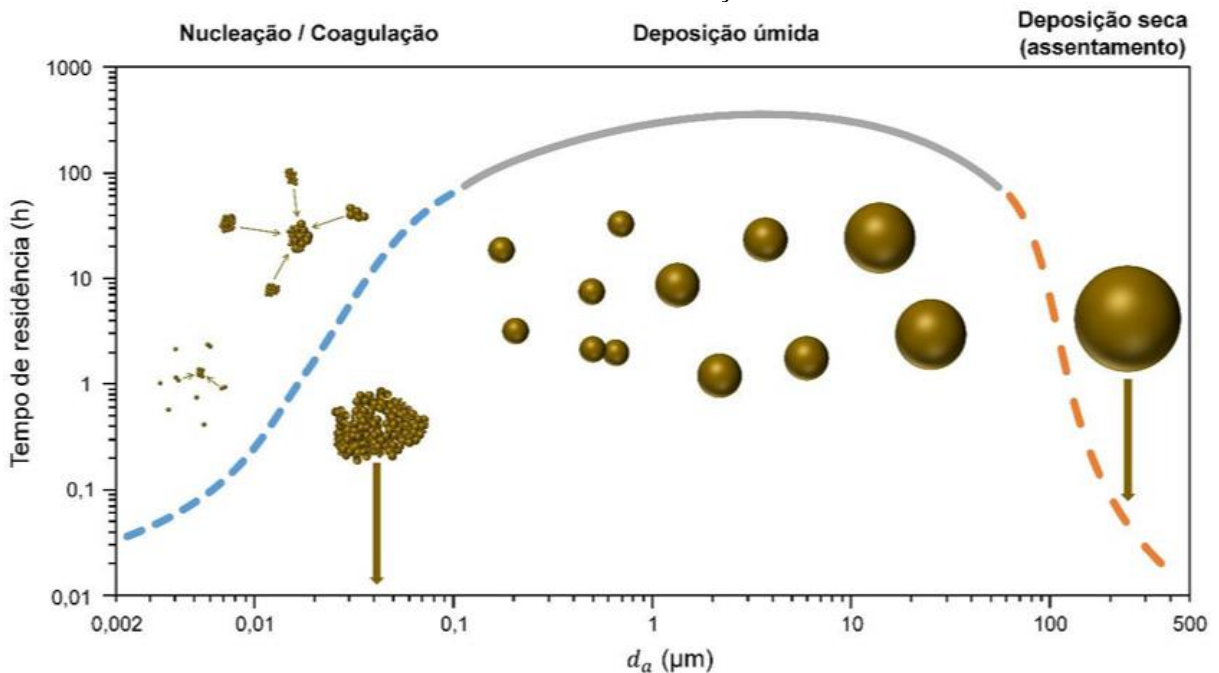
c) deposição úmida: essa faixa corresponde aos aerossóis que não são removidos, em maioria, por nenhum dos dois métodos citados anteriormente, e acabam permanecendo por mais tempo suspensos. Sua retirada se dá por processos hidrometeorológicos, tais quais: chuva, neve, nuvens e neblina. A faixa de atuação predominante se dá entre $MP_{0,1}$ e MP_{50} , com dois mecanismos (PAIXÃO, 2015):

- *rainout*: caracteriza-se pela formação de partículas maiores no interior das nuvens, onde o MP atua como núcleo de condensação; ou pela sua incorporação por Movimentos Brownianos, ou ainda, amplia sua dimensão pelo gradiente de vapor de água (PROCÓPIO, 2013);

- *washout*: a sua remoção ocorre via diversos processos de precipitação atmosférica e sua interceptação ao longo do processo de queda, incorporando-o no caminho, e o depositando nas superfícies terrestres, aquáticas, vegetais, entre outros (PROCÓPIO, 2013).

Um dos principais produtos da deposição úmida, quando em ambientes com demais substâncias tóxicas na atmosfera, a exemplo do SO_2 , é a chuva ácida. Ademais, de fato, o processo de nucleação converge a maior parte dos aerossóis em partículas que acabam por serem devolvidas ao solo pelo processo de deposição úmida. Importante, também, salientar que no concernente ao processo de assentamento, ele apresenta a menor contribuição entre todo o MP, para aqueles com d_a entre 0,1 micrômetros e 1 micrômetro, visto que a velocidade terminal aumenta com a diminuição do diâmetro do primeiro valor e também a partir do aumento do segundo (POVINEC et al., 2021). Estes processos de remoção estão esquematizados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Tempo de permanência do MP na atmosfera em função do tamanho e suas modalidades de Remoção



Fonte: MUHFELD et al. (2008)

4.3.2 Chuva, Vento, Temperatura e Umidade Relativa Atmosférica

A presença de chuva, e de precipitação de forma geral, faz com que a concentração de MP diminua de forma consistente, onde quanto maior a sua duração e maior sua intensidade, maior sua capacidade de retirada deste poluente, que se dá devido aos efeitos previamente descritos de *washout* e *rainout*, além de inibir a ressuspensão da poeira do solo, que contribui com parcela significativa dos particulados nos centros urbanos (GUERRA; MIRANDA, 2011; LIMA et al., 2003; MONTE; ALBURQUEQUE; REISEIN, 2016). Couto et al. (2020) também observam que há uma maior relação entre a deposição deste material com a variável

intensidade da chuva, do que com a sua duração, onde breves pancadas podem ser suficientes para proverem a limpeza da atmosfera.

Outra característica é que a abundância de núcleos de condensação e de vapor de água, ejetados no ar de forma antrópica, tende a ocasionar um aumento das precipitações sobre os espaços urbanos e redondezas. Soma-se a esse fenômeno, a presença das ilhas de calor e o respectivo fortalecimento das convecções térmicas associadas a turbulência mecânica do atrito do ar com as superfícies rugosas das cidades (SANTOS et al., 2019).

Santos et al. (2019), afirmam que reação semelhante pode ser observada a altos valores de umidade relativa do ar, apesar do valor não representar a água livre. Isso pois, o vapor disponível pode ser acrescentado nos processos de deposição úmida, incorporando o tamanho e a massa do Material Particulado, facilitando sua deposição. Isso corresponde a uma das justificativas do porque existe uma maior recorrência de alergias e doenças respiratórias em momentos de baixa umidade relativa, principalmente no inverno.

Couto et al. (2020) revelam que o fator temperatura está também, usualmente, associado pelos estudos, a uma diminuição da concentração do MP de forma indireta, pois temperaturas atmosféricas mais elevadas influenciam diretamente em outras variáveis que atuam de forma direta na remoção e dissipação dos aerossóis, como: aumento dos movimentos turbulentos verticais do ar, decorrentes da maior liberação de energia na forma de calor pelas superfícies; e o aumento da taxa de evaporação que contribuem para a ocorrência de chuvas.

O vento, por sua vez, possui forte associação ao espalhamento das plumas de componentes tóxicos no ar, seja por movimentos de convecção, como citado previamente, ou por advecção. Logo, usualmente, quanto maior a velocidade de deslocamento do ar, maior o nível de dispersão dos contaminantes. Por outro lado, em certos casos, sua presença pode inferir em um aumento de concentração de particulados, a depender de fatores como: sua velocidade e a topografia local. Um exemplo é a ressuspensão de partículas já depositadas, promovendo a poluição; uma outra situação é que a depender de sua direção e velocidade (preferencialmente baixa), pode carrear toxinas emitidas de uma zona industrial para o núcleo urbano (SANTOS; REBOITA; CARVALHO, 2018; SILVEIRA et al., 2021).

O inverno, por ser uma estação do ano no qual as localidades estão sujeitas a receber um menor nível radiação solar, devido aos raios solares atingirem a superfície de forma mais oblíqua e por um menor período de tempo, gera um período de resfriamento da atmosfera maior que o do seu aquecimento. Isso promove uma maior estabilidade, e no caso da região sudeste brasileira, coincide com períodos de estiagem, potencializando os cenários de

poluição do ar, já que há uma menor movimentação vertical e horizontal do mesmo e pouca precipitação (SILVA, 2008).

4.4 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E DIRETRIZES DA ONU

Para que ocorra um real controle e monitoramento da qualidade do ar para fins de manutenção do bem-estar da população e da qualidade ambiental, é necessário que se estabeleçam pesquisas e estudos que forneçam valores mínimos seguros para a exposição aos contaminantes presentes, e para que isso ocorra é necessário a implementação de leis e normas que regulamentem e fiscalizem os valores atribuídos, mediante aos tipos e tempo de exposição. Assim, conforme Couto et al. (2020), obtém-se informações para realizar diagnósticos de riscos e de desfechos de saúde a uma população de determinada região.

No Brasil, foi com a criação da Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que se estabeleceu os “padrões de qualidade ambiental”, via Conselho Nacional do Meio Ambiente, onde através de sua Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990, foi definido os padrões de qualidade do ar. Estes eram subdivididos em: padrões primários e secundários. Os primeiros são as concentrações que se ultrapassadas podem afetar a saúde da população, já o segundo configura valores sob os quais a população não sofreria impactos e os demais agentes estariam sob mínimo valor de risco adverso. Para os padrões primários, tinham-se os seguintes indicadores para o MP₁₀: os padrões primários e secundários eram equivalentes e a concentração média aritmética anual deveria ficar em até 50 µg/m³; e o valor médio diário deveria ser de até 150 µg/m³, não podendo ser excedido mais de uma vez ao ano (BRASIL, 1990). Nota-se que não se abordava a parcela referente a Moda Fina do Material Particulado Inalável e nem demais frações inferiores, sendo estas as mais prejudiciais.

Contudo, a resolução acima já não possui mais validade e a resolução vigente é a Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, revogando a Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. A Resolução atual se baseia nos valores estabelecidos pela WHO *global air quality guidelines*, de 2005, e adota como unidade de medida de concentração do MP o micrograma por metro cúbico, a semelhança da resolução anterior. Os padrões de qualidade do ar instituídos por este documento se baseiam na adoção temporária e progressiva de três padrões intermediários e o final. O padrão intermediário I entra em vigor juntamente com a publicação deste documento, e todos devem ser adotados sucessivamente, a depender dos Planos de Controle de Emissão Atmosférica elaborados pelos

órgãos ambientais estaduais, e sendo verificado a impossibilidade de avanço para a próxima categoria, mantém-se a vigente (BRASIL, 2018).

Para o padrão final, referente ao Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 μm , tem-se como referência, para períodos de 24h, o valor de até 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para o período de referência anual, valor baseado em média aritmética anual, a taxa final deve ser de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (BRASIL, 2018). Evidencia-se a retirada das PTS do quadro de monitoramento e a inclusão da Moda Fina.

Por sua vez, a OMS através da WHO *global air quality guidelines* (2021) estabelece como recomendável a concentração máxima média anual de MP_{10} de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tendo como subsídio para tal valor, os efeitos de longo prazo desse material sobre a mortalidade. Importante também ressaltar que, habitualmente, de 50% a 80% da massa de MP_{10} é composta por $\text{MP}_{2,5}$. Já para períodos de 24h, a organização recomenda um valor máximo de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, não devendo ser excedido mais do que 3 dias ou 4 dias ao ano. Salienta-se aqui, que este guia atualiza e estabelece novos parâmetros em relação ao WHO *global air quality guidelines* 2015, devido ao desenvolvimento de novas pesquisas, estudos e avanços técnicos relacionados ao real impacto de tais substâncias e os benefícios de sua redução.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde o advento da Primeira Revolução Industrial, a sociedade vem degradando o meio ambiente de forma célere e exponencial, consumindo seus recursos de forma predatória e sem se preocupar com os rejeitos gerados ao longo deste processo. Somente nas últimas décadas é que se presencia uma movimentação genuína a fim de prover alguma mudança nesse cenário de destruição. A atmosfera é um desses elementos, que ao ser impactada, retorna essa degradação na forma de inúmeras doenças, perda da qualidade de vida, impactos econômicos, entre outros.

Uma das principais parcelas deletérias desse processo, são os Materiais Particulados, em especial, os de Moda Fina, causando milhões de mortes por ano e prejuízos na casa dos trilhões de dólares. Por isso, objetivou-se com esse trabalho de revisão bibliográfica entender melhor como eles impactam os agentes receptores, nos quais se insere o ser humano. Como decorrência, de mesmo mediante um cenário hipotético de emissões pelas mesmas fontes, nas mesmas condições de temperatura e concentrações de ejeção, sob diferentes contextos atmosféricos e de atuação dos fatores do tempo que o regem, obtêm-se quantias de exposição diferenciadas.

Pelo exposto, conclui-se que a maior parte da população mundial vive em condições não adequadas a uma boa qualidade de vida, tendo prejuízos em seu dia a dia, em especial aquela residente nos grandes centros urbanos. Evidencia-se, portanto, que atingiu-se o objetivo do trabalho ao discutir a importância do tema, seus impactos nas esferas econômicas, sociais e ambientais, o configurando-o como um objeto que deve ser estudado profundamente. Apresentou-se também a evolução das leis nacionais da modalidade de maior impacto, o Material Particulado Inalável, e como os valores determinados se comparam com as recomendações internacionais, que estão sempre atualizando, devido as novas descobertas em relação aos seus efeitos prejudiciais.

Espera-se que tal obra sirva de auxílio a compreensão do assunto para os demais estudantes, pesquisadores e entidades interessadas sobre a temática e em tomar medidas que possam auxiliar na gestão dos municípios e estados, em sua qualidade ambiental. Devido a ser um tema relativamente recente, de mais valia e em constante atualização, é sugerido a partir deste e de demais fontes, o desenvolvimento de atividades práticas, como: verificação do atendimento a legislação nacional no que diz respeito a exposição ao Material Particulado; os principais elementos constituintes dos aerossóis de uma determinada região, para averiguar os

níveis de risco ao qual estão expostos parcela da população; a correlação de episódios críticos de concentração de MP e os impactos nos sistemas de saúde locais, entre outros.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, Cleverson Vitorio; DONHA, Annelissa Gobel. **Avaliação de impactos ambientais**. [s. l.], [entre 2017 e 2021]. Apostila de aula do Curso de Meio Ambiente e Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas.

AZEVEDO, Jezabel Miriam Fernandes. **A influência das variáveis ambientais (meteorológicas e de qualidade do ar) na morbidade respiratória e cardiovascular na Área Metropolitana do Porto**. 2010. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-24062010-120704/>. Acesso em: 24 jan. 2022.

BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BARBOSA, Cybelli Gonçalves Gregório. **Monitoramento de material particulado fino na cidade de Manaus para avaliação de potenciais riscos à saúde da população e caracterização de material particulado em ambiente de florestas (Atto - Amazonian tall tower observatory)- Amazonas, Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/35919>. Acesso em: 20 jan. 2022.

BARBOSA, Illelson Rafael da Silva. **Estudo da variabilidade e comparação dos métodos de estimativa da camada limite atmosférica na Amazônia Central**. 2018. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2392>. Acesso em: 07 jan. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 15937-15939, 22 ago. 1990. Disponível em: http://www.ibram.df.gov.br/images/resol_03.pdf. Acesso em: 24 out. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: Edição 223: Seção 1, Brasília, DF, p. 155, 21 nov. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603. Acesso em: 23 out. 2021.

BRITO, Gabriel Ferreira da Silva; SODRÉ, Fernando Fabríz; ALMEIDA, Fernanda Vasconcelos. O impacto do material particulado na qualidade do ar. **Revista Virtual de Química**, Brasília, v. 10, n. 5, p. 1-20, out. 2018. Disponível em: <https://www.ufjf.br/baccan/files/2019/04/Brito-Gabriel-RVQ-NoPrelo.pdf>. Acesso em: 17 out. 2021.

BROWN, Theodore Lawrence; LEMAY, Eugene; BURSTEN, Bruce Edward. **Química: a ciência central**. 9. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

BUSKE, Daniela. **Solução analítica da equação de difusão-advecção pelo método GILTT aplicada à dispersão de poluentes atmosféricos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/4149>. Acesso em: 12 jan. 2022.

CDC. CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. **Toxic substances portal: nitrogen oxides**. Atlanta, GA: CDC, 2021. Disponível em: <https://www.cdc.gov/TSP/substances/ToxSubstance.aspx?toxid=69>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar**. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 29 set. 2021.

COUTO, Lucas de Oliveira do *et al.* Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1-14, jul. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/sTzJf4V4ZtFKmsgDLGyR73d/?lang=pt#ModalArticles>. Acesso em: 30 out. 2021.

CPTEC. CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Princípios de Meteorologia e Meio Ambiente**. Brasília, DF: CPTEC, 2018. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>. Acesso em: 18 out. 2021.

EEA. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Air pollution**. Copenhagen: EEA, 2020. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/intro>. Acesso em: 27 dez. 2021.

EPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Particulate matter (PM) pollution**. Washington, D.C.: EPA, 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>. Acesso em: 16 set. 2021.

ESTEVES, Gheisa Roberta Telles *et al.* Análise dos impactos da contaminação do ar: o caso da cidade de São Paulo. *In: IV ENCONTRO ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE 2008*, 4., 2008, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: anppas, 2008. n.p. Disponível em: http://www.anppas.org.br/encontro_anual/encontro2/GT/GT06/gheisa_paula_ennio_sonia.pdf. Acesso em: out. 2008.

FILHO, Norman de Paula Arruda; LOIOLA, Gustavo Fructuozo. **Práticas de gestão empresarial Sustentável**. [s. l.], [2020 ou 2021]. Apostila de aula do Curso de Meio Ambiente e Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2008.

GOUVEIA, Nelson *et al.* Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v.22, n.12, p.2669-2677, dez. 2006. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/csp/a/cjGHmQb6wT9PbZWn5tkjv3b/?lang=pt#>. Acesso em: 20 out. 2021.

GUERRA, Fernando Pinto; MIRANDA, Regina Maura de. Influência da meteorologia na concentração do poluente atmosférico PM_{2,5} na RMRJ e na RMSP. *In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL*, 2., 2011, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: Ibeas, 2011. p. 1-10. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/IV-007.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2021.

JACOBSON, Marc. **Air pollution and global warming: history, science, and solutions**. 2th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

KIM, Ki-Hyun; KABIR, Ehsanul; KABIR, Shamin. A review on the human health impact of airborne particulate matter. **Environment International**, [s. l.], v. 74, p. 136-143, jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014002992>. Acesso em: 23 out. 2021.

LabCAA. LABORATÓRIO DE CLIMATOLOGIA E ANÁLISE AMBIENTAL. **[Monitoramento da qualidade do ar em Juiz de Fora em relação ao MP₁₀]**. Juiz de Fora: [s. n.], [2002?]. Disponível em: <https://docplayer.com.br/18389764-Introducao-equipamentos.html>. Acesso em: 29 out. 2021.

LAZZARI, Angela Radunz; CAMARGO, Maria Emilia; SCHNEIDER, Rosana de Cassia de Souza. Análise de regressão múltipla das concentrações de PM₁₀ em função de elementos meteorológicos para Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, em 2005 e 2006. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n.1, p. 49-55, mar. 2011. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/download/9627/9627/>. Acesso em: 02 jan. 2022.

LIMA, Pedro Higgins Ferreira de *et al.* Estudos da poluição veicular de Juiz de Fora - MG. *In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA*, 10., 2003, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: UERJ, 2003. p. 1-12. Disponível em: <http://www.belcavello.com.br/publica/artigos/anais/2003xsbfga/lima%20Coliveira%20Cferreira%20martins2003xsbfga.pdf?attredirects=0&d=1>. Acesso em: 22 dez. 2021.

MALHEIROS, André Luciano; DIAS, Nelson Luis. Determinação prática da altura da camada-limite atmosférica para aplicação em modelos de dispersão de poluentes. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 13., 2004, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: CBMET, 2004. p. 1-3

MENDONÇA, Francisco; OLIVEIRA, Inês Moresco Danni. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MIMURA, Aparecida Maria Simões. **Estudo crítico de métodos de preparo de amostras de material particulado atmosférico para determinação de elementos-traço por espectrometria de absorção atômica**. 2017. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/5714>. Acesso em: 01 out. 2021.

MIRANDA, Gabriela Soares de *et al.* A influência da chuva na concentração de material particulado atmosférico (MP₁₀). In: VIII FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO, 8., 2017, Camboriú. **Anais** [...]. Camboriú: IFC Camboriú, 2017. p. 1-6. Disponível em: <http://www.camboriu.ifc.edu.br/wp-content/uploads/2018/03/avaliacaoar.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2021.

MONTE, Edson Zambon; ALBUQUERQUE, Taciana Toledo de Almeida; REISEN, Valdério Anselmo. Impactos das variáveis meteorológicas na qualidade do ar da região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 546-554, dez. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/DHYFSsLh5Z6YKPWsNKNXNBr/?lang=pt>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MÜHLFELD, Christian *et al.* Interactions of nanoparticles with pulmonary structures and cellular responses. **American Journal Of Physiology-Lung Cellular And Molecular Physiology**, [s. l.], v. 294, n. 5, p. 817-829, maio 2008. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/ajplung.00442.2007>. Acesso em: 28 out. 2021.

NASA. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Air quality observations from space: particulate matter**. Washington, D.C.: NASA, 2022. Disponível em: <https://airquality.gsfc.nasa.gov/particulate-matter>. Acesso em: 13 jan. 2022.

NOSSA, Valcemiro; RODRIGUES, Víctor Rangel dos Santos; NOSSA, Sylvania Neris. O que se tem pesquisado sobre sustentabilidade empresarial e sua evidenciação?. **Revista de Educação e Pesquisa em Contabilidade**, Brasília, v. 11, p. 87-105, dez. 2017. Disponível em: <https://www.repec.org.br/repec/article/view/1719/1288>. Acesso em: 07 jun. 2021.

NRDC. NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL. **Air pollution: everything you need to know**. New York, NY: NRDC, 2021. Disponível em: <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know>. Acesso em: 19 dez. 2021.

NSW GOVERNMENT. NEW SOUTH WALES GOVERNMENT. **Outdoor air pollution**. Canberra: NSW GOVERNMENT, 2021. Disponível em: <https://www.health.nsw.gov.au/environment/air/Pages/outdoor-air-pollution.aspx>. Acesso em: 15 jan. 2022.

OECD. THE ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Glossary of statistical terms: air pollution**. Paris: OECD, 2001. Disponível em: <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=86#:~:text=Web%20Service,produce%20other%20harmful%20environmental%20effects>. Acesso em: 12 fev. 2022.

PAIXÃO, Lúcia Cardoso da. **Utilização do CATT-BRAMS para análise do transporte e dispersão de material particulado e monóxido de carbono proveniente da queima da biomassa e da atividade industrial no estado do Pará**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11033>. Acesso em: 10 jan. 2022.

PEREIRA, João Victor Inácio. Sustentabilidade: diferentes perspectivas, um objectivo comum. **Economia Global e Gestão**, Lisboa, v. 14, n. 1, p. 115-126, abr. 2009. Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0873-74442009000100008&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 15 fev. 2022.

PIELKE, Roger. **Atmosphere**. [S. l.]: Encyclopedia Britannica, 2021.

POVINEC, Pavel et al. Radioactivity impact on Japan. *In*: POVINEC, Pavel et al. **Fukushima Accident**. 2th ed. [s.l.]: Elsevier, 2021. P. 245-384. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244968000018>. Acesso em: 07 fev. 2022.

PRESS, Frank et al. **Para entender a terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

PRIOLI, Gildeone. **Estimativa da concentração de material particulado inalável (PM₁₀) através de variáveis meteorológicas e seus efeitos na saúde em áreas urbanas brasileiras**. 2016. Tese (Doutorado em Medicina) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-06032017-153237/>. Acesso em: 23 nov. 2021.

PROCÓPIO, Aline Sarmento. **Introdução a poluição atmosférica**. 2013. 13 p. Notas de aula, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora.

QUEIROZ, Paula Guimarães Moura; JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; MENEZES, Maria Ângela de Barros Correia. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1233-1239, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/NkWDdqrL44kQDbyHjrxFd8p/?lang=pt>. Acesso em: 01 out. 2021.

ROCHA, Júlio César; ROSA, André Henrique; CARDOSO, Arnaldo Alves. **Introdução à química ambiental**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

RUSSO, Paulo Roberto. Poluição atmosférica: refletindo sobre a qualidade ambiental em áreas urbanas. **Educação Pública**, [s. l.], s.d., 01 jan. 2002. Disponível em: <https://educacao publica.cecierj.edu.br/artigos/2/1/poluicao-atmosferica-refletindo-sobre-a-qualidade-ambiental-em-areas-urbanas>. Acesso em: 20 out. 2021.

SANTOS, Antônio Raimundo dos; SKORA, Claudio Marlus. **Meio ambiente e sustentabilidade**. [S. l.], [entre 2018 e 2021]. Apostila de aula do Curso de Meio Ambiente e Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas.

SANTOS, Tailine Corrêa dos; REBOITA, Michelle Simões; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto. Investigação da relação entre variáveis atmosféricas e a concentração de MP₁₀ e O₃ no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 631-645, dez. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/DfJjG68rDmhFdqPP9NwPwby/?lang=pt>. Acesso em: 20 jan. 2022.

SANTOS, Fábio Soares dos et al. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) em Belo Horizonte, MG. **Engenharia**

Sanitária e Ambiental, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 371-381, abr. 2019. Disponível em: [https://www.scielo.br/j/esa/a/4kSVDKgVcYnwNFt5R6Yb5pp/?lang=pt#:~:text=Foi%20observada%20diferen%C3%A7a%20significativa%20entre,do%20vento\)%20para%20esses%20per%C3%ADodos..](https://www.scielo.br/j/esa/a/4kSVDKgVcYnwNFt5R6Yb5pp/?lang=pt#:~:text=Foi%20observada%20diferen%C3%A7a%20significativa%20entre,do%20vento)%20para%20esses%20per%C3%ADodos..) Acesso em: 15 out. 2021.

SILVA, Ederwanda Barbosa Lage. **Estudo sobre a qualidade do ar na cidade de Juiz de Fora**: contribuição dos veículos automotores. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008. Disponível em: <http://www.ufjf.br/analiseambiental/files/2009/11/Ederwanda-Barbosa-Lage-Silva.pdf>. Acesso em: 07 out. 2021.

SILVEIRA, Thiago Souza *et al.* Análise do clima e relevo na concentração de material particulado em Madrid (Espanha) e São Paulo (Brasil). **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 28, n. 17, p. 520-543, maio 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/76313>. Acesso em: 05 nov. 2021.

SMITH, William. **Air pollution and forests**: interactions between air contaminants and forest ecosystems. 2th ed. [S. l.]: Springer, 2012.

STULL, Roland. **An introduction to boundary layer meteorology**: atmospheric sciences library. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.

TAYLOR, George; JOHNSON, Dale; ANDERSEN, Christian. Air pollution and forest ecosystems: a regional to global perspective. **Ecological Applications**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 662-689, nov. 1994. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Air-Pollution-and-Forest-Ecosystems%3A-A-Regional-to-Taylor-Johnson/c2f7443af8bab08defe1df3259d6dbd7d701ab40>. Acesso em: 20 jan. 2022.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; MARTINS, Luiz Alberto. Determinação dos fatores que influenciam na concentração do material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora – MG. **Geoambiente On-Line**, Jataí, n. 5, p. 54-76, jul./dez. 2005. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/25905>. Acesso em: 27 out. 2021.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; MARTINS, Luiz Alberto. Poluição atmosférica em Juiz de Fora, MG. *In*: TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; ROCHA, Geraldo César; RIBEIRO, Guido Assunção (org.). **Geociências aplicadas**: diferentes abordagens. Ubá: Geographica, 2008. p. 91-110.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines**: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Acesso em: 13 out. 2021.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air pollution**. Geneva: WHO, 2022. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Acesso em: 15 jan. 2022.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **FAQs - climate**. Geneva: WMO, 2022. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/climate>. Acesso em: 03 jan. 2022.

WORLD BANK. **The Cost of Air Pollution**: strengthening the economic case for action. Washington: Ime, 2016. Disponível em: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/781521473177013155/the-cost-of-air-pollution-strengthening-the-economic-case-for-action>. Acesso em: 04 out. 2021.