



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DO AR DE  
DUAS ESTAÇÕES FIXAS DE BELO HORIZONTE - ANO BASE 2019**

**Pedro Lage Soares**

**Belo Horizonte**

**2021**

**Pedro Lage Soares**

**AVALIAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DO AR DE  
DUAS ESTAÇÕES FIXAS DE BELO HORIZONTE - ANO BASE 2019**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Dra. Patrícia Sueli de Rezende

Belo Horizonte  
2021

**PEDRO LAGE SOARES**

**AVALIAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DO AR DE  
DUAS ESTAÇÕES FIXAS DE BELO HORIZONTE - ANO BASE 2019**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 05 de Abril de 2021

Banca examinadora:

---

Patrícia Sueli de Rezende – Presidente da Banca Examinadora  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. CEFET-MG – Orientadora

---

Luzia Sergina de França Neta  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. CEFET-MG

---

Cleverson Fernando Garcia  
Prof. Dr. + CEFET-MG



Emitido em 05/04/2021

**FORMULÁRIO DE PROGRAMA Nº 41/2021 - DEQUI (11.55.09)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 05/04/2021 19:24 )*

CLEVERSON FERNANDO GARCIA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEQUI (11.55.09)  
Matrícula: 2550468

*(Assinado digitalmente em 05/04/2021 22:07 )*

LUZIA SERGINA DE FRANCA NETA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
PPGTPP (11.52.15)  
Matrícula: 1811596

*(Assinado digitalmente em 05/04/2021 18:25 )*

PATRICIA SUELI DE REZENDE  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEQUI (11.55.09)  
Matrícula: 2921402

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número:  
**41**, ano: **2021**, tipo: **FORMULÁRIO DE PROGRAMA**, data de emissão: **05/04/2021** e o código de verificação:  
**bbfd989d2b**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus familiares e amigos que estiveram junto comigo nessa jornada de alguns anos, pelo apoio, suporte, incentivo e por compartilharem não só os bons momentos, mas também os desafios enfrentados no percurso da graduação.

Agradeço ao CEFET-MG, sobretudo aos professores do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental (DCTA), no qual meu curso está lotado, pelos compartilhares do conhecimento e por dividirem ensinamentos, vivências e competências.

Agradeço também à minha orientadora de TCC, a professora Dra. Patrícia Sueli de Rezende, por ter aceitado a proposta de me orientar, pelos conselhos, pelas reuniões e pela dedicação em construir junto comigo este trabalho.

Por fim, agradeço aos professores Dr. Cleverson Fernando Garcia e Dra. Luzia Sergina de França Neta, por terem aceitado o convite de compor a banca avaliadora deste trabalho.

## RESUMO

SOARES, PEDRO LAGE. **Avaliação dos Dados de Monitoramento de Qualidade do Ar de Duas Estações Fixas de Belo Horizonte - Ano Base 2019**. 2021. 114 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

Estima-se que mais de 7 milhões de pessoas em todo mundo morram prematuramente, por ano, devido a doenças causadas pelos efeitos tóxicos do ar poluído, índice que coloca a poluição do ar em segundo lugar no ranking de principais riscos à saúde atualmente, atrás somente da pandemia da COVID-19. Por isso, identificar os principais contaminantes atmosféricos e gerenciar suas fontes de emissão torna-se fundamental para prevenir os efeitos adversos da poluição atmosférica. Dado o contexto, são definidos níveis minimamente seguros para a proteção da saúde da população, os quais são expressos em valores da concentração dos principais poluentes no ar. No Brasil, os padrões de qualidade do ar atualmente vigentes são definidos pela resolução CONAMA nº 491 de 2018. Desta, forma, o presente trabalho teve como objetivos analisar os dados de duas estações de monitoramento localizadas em importantes avenidas da cidade de Belo Horizonte (MG), relativos ao ano de 2019, com vistas a estabelecer correlações entre os poluentes e dados meteorológicos, bem como fazer uma análise estatística que permita discutir os resultados frente aos padrões vigentes. Os dados, divulgados pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) de Minas Gerais, são relativos às concentrações de material particulado respirável e inalável ( $MP_{2,5}$  e  $MP_{10}$ , respectivamente), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), ozônio ( $O_3$ ) e monóxido de carbono (CO). Já os dados meteorológicos fornecidos pelas estações são temperatura, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar e umidade relativa. O tratamento dos dados para geração de gráficos de dispersão foi precedido da avaliação por estatística descritiva e avaliação de correlações do tipo univariadas (Boxplots e Correlação de Pearson) e multivariadas (Análise de Agrupamento Hierárquico – HCA e Análise de Componentes Principais – PCA), com auxílio dos softwares STATISTICA®, versão 10 da Statsoft Inc. e o Excel versão 2016 do Microsoft Office. Foi possível observar a influência de parâmetros meteorológicos nas concentrações de determinados poluentes, sobretudo materiais particulados e ozônio, além de constatar comportamentos conforme a variação sazonal (ao longo do ano) e horária (ao longo do dia). Dessa forma, foi possível levantar hipóteses a respeito da poluição atmosférica na cidade, à luz da bibliografia consultada, e observar que, apesar da complexidade existente nos processos físico-químicos que atuam na atmosfera troposférica, é possível traçar relações entre as variáveis atuantes. Em termos de concentração de poluentes, as médias obtidas foram maiores na estação localizada na Avenida Amazonas, enquanto para os parâmetros meteorológicos houve similaridade em ambas as estações de monitoramento avaliadas. Foram constatadas correlações fortes entre os poluentes  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  nas duas estações de monitoramento; do  $O_3$  com a temperatura e radiação solar na estação da Avenida do Contorno; e uma correlação do tipo inversa, apesar de fraca, entre precipitação e umidade relativa com os materiais particulados. Na Avenida Amazonas, observou-se a falta de dados para os poluentes  $SO_2$  e  $O_3$ . O padrão de qualidade do ar atualmente vigente foi ultrapassado para os poluentes  $MP_{10}$  (Av. do Contorno) em 5 dias, e  $O_3$  (Av. Amazonas) em 33 dias. Já o padrão de qualidade final (PF) foi ultrapassado para o  $MP_{10}$  em 10 dias na Av. Amazonas e 48 dias na Av. do Contorno; para o  $MP_{2,5}$  foi ultrapassado em 28 dias na Av. Amazonas e 12 dias na Av. do Contorno; para o  $O_3$  esse padrão foi ultrapassado em 53 dias somente na Av. Amazonas. As concentrações dos poluentes  $NO_2$ ,  $SO_2$  e CO não ultrapassaram sequer o PF em nenhum dia do ano de 2019. Além disso, a análise multivariada mostrou-se satisfatória por complementar a visão e traçar relações

que uma simples avaliação de distribuição dos dados não é capaz de fazer, sendo possível levantar hipóteses a respeito das relações existentes dos poluentes entre si e deles com os parâmetros meteorológicos.

**Palavras-chave:** Poluição atmosférica. Padrões de qualidade do ar. Comparação estatística.

## ABSTRACT

SOARES, PEDRO LAGE. **Evaluation of Air Quality Monitoring Data from Two Fixed Stations in Belo Horizonte - Base Year 2019**. 2021. 114 p. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

It is estimated that more than 7 million people worldwide die prematurely each year, due to diseases caused by the toxic effects of polluted air, an index that puts air pollution in second place in the ranking of main health risks, behind only to the COVID-19 pandemic. In this context, identifying the main contaminants and managing their emission sources is essential to prevent the adverse effects of air pollution. Based on this objective, minimally safe levels are defined for the protection of the population's health, which are expressed in values of the concentration of each pollutant in the air. In Brazil, the air quality standards currently in force are defined by CONAMA Resolution n° 491 of 2018. In this way, the present work had as objectives to analyze the data of two monitoring stations located on important avenues in the city of Belo Horizonte (MG), related to the 2019, with a view to establishing correlations between pollutants and meteorological data, as well as making a statistical analysis that allows discussing the results against current standards. The data, released by the Minas Gerais State Environment Foundation (FEAM), are related to the concentrations of respirable and inhalable particulate material (MP<sub>2.5</sub> and MP<sub>10</sub>, respectively), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>) and carbon monoxide (CO). The meteorological data provided by the stations are temperature, precipitation, wind direction and speed, solar radiation, and relative humidity. The treatment of data for the generation of scatter plots was preceded by the evaluation by descriptive statistics and the evaluation of univariate (Boxplots and Pearson's Correlation) and multivariate (Hierarchical Cluster Analysis - HCA and Principal Component Analysis - PCA) correlations, with aid of STATISTICA® software, version 10 from Statsoft Inc. and Excel version 2016 from Microsoft Office. It was possible to observe the influence of meteorological parameters on the concentrations of certain pollutants, especially particulate materials and ozone, in addition to observing behaviors according to seasonal (throughout the year) and hourly (throughout the day) variations. Thus, it was possible to raise hypotheses about atmospheric pollution in the city, in the light of the bibliography consulted, and to observe that, despite the complexity existing in the physical-chemical processes that operate in the tropospheric atmosphere, it is possible to trace relationships between the active variables. In terms of pollutant concentration, the averages obtained were higher at the station located on Amazonas Avenue, while for meteorological parameters there was similarity in both evaluated monitoring stations. Strong correlations were found between pollutants MP<sub>10</sub> and MP<sub>2.5</sub> at the two monitoring stations; the O<sub>3</sub> with temperature and solar radiation at the Avenue of Contorno station; and an inverse correlation, although weak, between precipitation and relative humidity with particulate materials. On Amazonas Avenue, there was a lack of data for pollutants SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. The air quality standard currently in force was exceeded for pollutants MP<sub>10</sub> (Do Contorno Av.) in 5 days, and O<sub>3</sub> (Amazonas Av.) in 33 days. The final quality standard (PF) was exceeded for the MP<sub>10</sub> in 10 days at Amazonas Av. and 48 days at Do Contorno Av.; for MP<sub>2.5</sub> it was exceeded by 28 days at Amazonas Av. and 12 days at Do Contorno Av.; for O<sub>3</sub>, this standard was exceeded in 53 days only at Amazonas Av. The concentrations of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO pollutants did not even exceed PF on any day of 2019. The multivariate analysis proved to be satisfactory because it complemented the vision and traced relationships that a simple assessment of data distribution is not capable of, making it possible to raise hypotheses about

the existing relationships between pollutants between themselves and them with the meteorological parameters.

**Keywords:** Air pollution. Air quality standards. Statistical comparison.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVOS.....	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
3.1	Poluição Atmosférica .....	18
3.1.1	Material Particulado (MP).....	19
3.1.2	Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> ) .....	20
3.1.3	Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) .....	22
3.1.4	Ozônio (O <sub>3</sub> ) .....	23
3.1.5	Monóxido de Carbono (CO).....	30
3.1.6	Chumbo (Pb).....	31
3.2	Padrões de Qualidade Do Ar .....	32
3.2.1	Legislação Aplicável .....	35
3.3	Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar .....	42
3.4	Análise Estatística.....	46
3.4.1	Boxplots.....	46
3.4.2	Estatística Multivariada – HCA e PCA .....	46
4	METODOLOGIA.....	49
4.1	Local de Estudo e Obtenção de dados .....	49
4.2	Tratamento de dados e análise estatística .....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
5.1	Estatística Descritiva .....	55
5.2	Gráficos de Dispersão.....	57
5.2.1	Material Particulado Inalável - MP <sub>10</sub> .....	57
5.2.2	Material Particulado Respirável - MP <sub>2,5</sub> .....	60
5.2.3	NO <sub>2</sub> .....	64

5.2.4	SO <sub>2</sub> .....	66
5.2.5	O <sub>3</sub> .....	69
5.2.6	CO .....	73
5.3	Variação sazonal.....	75
5.4	Variação Horária.....	82
5.5	Análise de Correlação linear .....	90
5.6	Análise Multivariada – Gráficos de HCA e PCA.....	93
6	CONCLUSÕES .....	106
7	REFERÊNCIAS .....	109

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Fórmula estrutural do dióxido de nitrogênio.....	21
<b>Figura 2</b> – Fórmula estrutural do dióxido de nitrogênio.....	22
<b>Figura 3</b> – Variação da concentração de poluentes constituintes do smog fotoquímico ao longo do dia .....	23
<b>Figura 4</b> – Fórmula estrutural do ozônio .....	24
<b>Figura 5</b> – Reações atmosféricas dos compostos orgânicos voláteis na formação de ozônio .	26
<b>Figura 6</b> - Esquema de formação de ozônio a partir dos COVs e NO <sub>x</sub> .....	28
<b>Figura 7</b> – Típica isopleta de ozônio usada pela EPA .....	29
<b>Figura 8</b> – Importância dos Padrões de Qualidade do Ar na gestão da qualidade do ar .....	32
<b>Figura 9</b> – Estrutura do Índice de Qualidade do Ar.....	40
<b>Figura 10</b> – Efeitos à saúde associados às faixas do Índice de Qualidade do Ar – IQAR. ....	41
<b>Figura 11</b> – Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar na RMBH .....	44
<b>Figura 12</b> – Estação Automática Fixa de monitoramento de dados meteorológicos e de qualidade do ar (Estação CMMR – RMBH) .....	45
<b>Figura 13</b> – Equipamentos no interior da estação de monitoramento .....	45
<b>Figura 14</b> – Informações contidas no boxplot .....	46
<b>Figura 15</b> – Localização estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte. ....	49
<b>Figura 16</b> – Fluxograma de trabalho para análise estatística.....	54
<b>Figura 17</b> – Boxplots de MP <sub>10</sub> na Estação da Avenida Amazonas .....	77
<b>Figura 18</b> - Boxplots de MP <sub>2,5</sub> na Estação da Avenida Amazonas.....	77
<b>Figura 19</b> - Boxplots de O <sub>3</sub> na Estação da Avenida Amazonas .....	77
<b>Figura 20</b> - Boxplots de NO <sub>2</sub> na Estação da Avenida Amazonas .....	77
<b>Figura 21</b> - Boxplots de CO na Estação da Avenida Amazonas .....	78
<b>Figura 22</b> - Boxplots de SO <sub>2</sub> na Estação da Avenida Amazonas .....	78
<b>Figura 23</b> - Boxplots de MP <sub>10</sub> na Estação da Avenida do Contorno .....	79
<b>Figura 24</b> - Boxplots de MP <sub>2,5</sub> na Estação da Avenida do Contorno .....	79
<b>Figura 25</b> - Boxplots de O <sub>3</sub> na Estação da Avenida do Contorno .....	79
<b>Figura 26</b> - Boxplots de NO <sub>2</sub> na Estação da Avenida do Contorno .....	79
<b>Figura 27</b> - Boxplots de CO na Estação da Avenida do Contorno.....	80
<b>Figura 28</b> - Boxplots de SO <sub>2</sub> na Estação da Avenida do Contorno .....	80

<b>Gráfico 1</b> - Dispersão dos dados de MP <sub>10</sub> da estação localizada na Av. Amazonas .....	57
<b>Gráfico 2</b> - Dispersão dos dados de MP <sub>10</sub> da estação localizada na Av. do Contorno .....	58
<b>Gráfico 3</b> - Distribuição dos valores médios diários de MP <sub>10</sub> na Avenida Amazonas .....	59
<b>Gráfico 4</b> - Distribuição dos valores médios diários de MP <sub>10</sub> na Avenida do Contorno.....	60
<b>Gráfico 5</b> - Distribuição dos dados de MP <sub>2,5</sub> da estação localizada na Av. Amazonas .....	61
<b>Gráfico 6</b> - Distribuição dos dados de MP <sub>2,5</sub> da estação localizada na Av. do Contorno.....	61
<b>Gráfico 7</b> - Distribuição dos valores médios diários de MP <sub>2,5</sub> na Avenida Amazonas .....	63
<b>Gráfico 8</b> - Distribuição dos valores médios diários de MP <sub>2,5</sub> na Avenida do Contorno .....	63
<b>Gráfico 9</b> - Distribuição dos dados de NO <sub>2</sub> da estação localizada na Av. Amazonas .....	64
<b>Gráfico 10</b> - Distribuição dos dados de NO <sub>2</sub> da estação localizada na Av. do Contorno.....	65
<b>Gráfico 11</b> - Distribuição dos dados de SO <sub>2</sub> da estação localizada na Av. Amazonas.....	66
<b>Gráfico 12</b> - Distribuição dos dados de SO <sub>2</sub> da estação localizada na Av. do Contorno .....	67
<b>Gráfico 13</b> - Distribuição dos valores médios diários de SO <sub>2</sub> na Avenida Amazonas .....	68
<b>Gráfico 14</b> - Distribuição dos valores médios diários de SO <sub>2</sub> na Avenida do Contorno.....	69
<b>Gráfico 15</b> - Distribuição dos dados de O <sub>3</sub> da estação localizada na Av. Amazonas .....	70
<b>Gráfico 16</b> - Distribuição dos dados de O <sub>3</sub> da estação localizada na Av. do Contorno.....	70
<b>Gráfico 17</b> - Distribuição dos valores de máxima média móvel diária de O <sub>3</sub> na Avenida Amazonas .....	72
<b>Gráfico 18</b> - Distribuição dos valores de máxima média móvel diária de O <sub>3</sub> na Avenida do Contorno .....	72
<b>Gráfico 19</b> - Distribuição da concentração de CO na Avenida Amazonas.....	73
<b>Gráfico 20</b> - Distribuição da concentração de CO na Avenida do Contorno .....	74
<b>Gráfico 21</b> - Distribuição da máxima média móvel diária da concentração de CO na Avenida Amazonas .....	75
<b>Gráfico 22</b> - Distribuição da máxima média móvel diária da concentração de CO na Avenida do Contorno .....	75
<b>Gráfico 23</b> - Distribuição da concentração de MP e umidade relativa no dia 05/01/2019 na Avenida Amazonas.....	86
<b>Gráfico 24</b> - Distribuição da concentração de MP e umidade relativa no dia 05/01/2019 na Avenida do Contorno .....	86
<b>Gráfico 25</b> - Distribuição da concentração de MP <sub>10</sub> , NO <sub>2</sub> e SO <sub>2</sub> no dia 05/01/2019 na Avenida Amazonas .....	87
<b>Gráfico 26</b> - Distribuição da concentração de MP <sub>10</sub> , NO <sub>2</sub> e SO <sub>2</sub> no dia 05/01/2019 na Avenida do Contorno.....	88

<b>Gráfico 27</b> - Distribuição da concentração de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> e radiação solar no dia 05/01/2019 na Avenida Amazonas.....	89
<b>Gráfico 28</b> - Distribuição da concentração de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> e radiação solar no dia 05/01/2019 na Avenida do Contorno .....	89
<b>Gráfico 29</b> – Dendrograma de Agrupamento Hierárquico (HCA) referente aos dados da Avenida Amazonas.....	94
<b>Gráfico 30</b> – Dendrograma de Agrupamento Hierárquico (HCA) referente aos dados da Avenida do Contorno .....	96
<b>Gráfico 31</b> – Distribuição de Componentes Principais para dados da Avenida Amazonas ....	97
<b>Gráfico 32</b> – Distribuição de Componentes Principais para dados da Avenida do Contorno .	98
<b>Gráfico 33</b> – Plano fatorial dos componentes CP1 x CP2 – Avenida Amazonas.....	99
<b>Gráfico 34</b> - Plano fatorial das componentes CP2 x CP3 – Avenida Amazonas .....	100
<b>Gráfico 35</b> - Plano fatorial das componentes CP1 x CP3 – Avenida Amazonas .....	101
<b>Gráfico 36</b> - Plano fatorial das componentes CP1 x CP2 – Avenida do Contorno .....	102
<b>Gráfico 37</b> - Plano fatorial das componentes CP2 x CP3 – Avenida do Contorno .....	103
<b>Gráfico 38</b> - Plano fatorial das componentes CP1 x CP3 – Avenida do Contorno .....	104
<b>Quadro 1</b> – Métodos de amostragem de poluentes monitorados pelas estações automáticas.	43
<b>Quadro 2</b> – Tratamento realizado nos dados brutos de poluentes para geração de gráficos de distribuição ao longo do ano.....	52

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> – Valores-guia para cada poluente.....	33
<b>Tabela 2</b> – Valores-guia para monóxido de carbono (CO).....	34
<b>Tabela 3</b> – Padrão de qualidade do ar definido na CONAMA nº 03/90.....	36
<b>Tabela 4</b> – Padrões de qualidade do ar fixados pela Resolução CONAMA nº 491/2018 .....	37
<b>Tabela 5</b> – Níveis de atenção, alerta e emergência para cada poluente .....	39
<b>Tabela 6</b> – Faixas definidas para a classificação “Boa” do IQAR .....	39
<b>Tabela 7</b> – Normal climatológica de Belo Horizonte – 1981 a 2010 .....	51
<b>Tabela 8</b> – Estatística descritiva dos dados da Estação Av. Amazonas .....	55
<b>Tabela 9</b> - Estatística descritiva dos dados da Estação Av. do Contorno .....	55
<b>Tabela 10</b> – Dados horários de concentração de poluentes e de parâmetros meteorológicos do dia 05/01/2019 na estação da Avenida Amazonas .....	84
<b>Tabela 11</b> – Dados horários de concentração de poluentes e de parâmetros meteorológicos do dia 05/01/2019 na estação da Avenida do Contorno .....	85
<b>Tabela 12</b> – Matrizes de correlação de Pearson das avenidas Amazonas e do Contorno .....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  - micrograma por metro cúbico

CO – Monóxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COV – Composto Orgânico Volátil

EPA – *Environmental Protection Agency*

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

Hab/ $\text{km}^2$  - habitantes por quilômetro quadrado

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IQAR – Índice de Qualidade do Ar

Mm – milímetros

MP – Material particulado

NO – Óxido nítrico

NO<sub>2</sub> – Dióxido de nitrogênio

NO<sub>x</sub> – Óxidos de nitrogênio

O<sub>3</sub> – Ozônio

OMS – Organização Mundial de Saúde

PF – Padrão Final

PI-1 – Padrão Intermediário 1

PI-2 – Padrão Intermediário 2

PI-3 – Padrão Intermediário 3

ppm – partes por milhão

PQAR – Padrão de Qualidade do Ar

PTS – Partículas Totais em Suspensão

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

UV – Radiação ultravioleta

WHO – *World Health Organization*

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica pode ser entendida como a inserção de matéria ou energia com características tais que possam tornar o ar impróprio, seja pela nocividade à saúde ou ameaça ao bem-estar público, diretamente associados à qualidade de vida, seja pelos danos aos materiais, à fauna e à flora (CONAMA, 2018).

A história da humanidade aponta que problemas maiores advindos da poluição do ar começaram quando o homem passou a se organizar em cidades, sobretudo com relação a emissão de maus odores devido às condições precárias de saneamento e a falta de preocupação com questões de ordem higiênica, o que remonta ao período da Idade Média. No entanto, somente a partir da Revolução Industrial, com o advento da tecnologia industrial e consequente intensificação da queima de combustíveis fósseis, a poluição do ar passou então a se constituir como um problema maior devido ao risco real oferecido à saúde pública. Episódios críticos em diversas partes do mundo marcaram a história, registrados sobretudo no século XX, como o conhecido “*The Great Smog of London*” ocorrido em 1952, que foi responsável por matar cerca de 12 mil pessoas e afetar outras 150 mil, evento este ocasionado pela combinação severa da presença de poeira em suspensão e dióxido de enxofre com o fenômeno da inversão térmica (BAIRD & CANN, 2011; FERREIRA, 2016; GUIMARÃES, 2011; LISBOA, 2014).

Estima-se que a cada ano mais de 5,5 milhões de pessoas em todo mundo morram prematuramente devido a doenças causadas pelos efeitos tóxicos do ar poluído, incluindo câncer de pulmão, doenças cardiovasculares, derrame, infecções respiratórias agudas, dentre outras. Esse índice de mortes coloca a poluição do ar em quarto lugar no ranking de principais riscos à saúde, segundo dados do ano de 2013 (WORLD BANK & IHME, 2016).

Estimativas atualizadas da Organização Mundial da Saúde (OMS), pertencente à ONU (Organização das Nações Unidas), indicam que cerca de 7 milhões de óbitos todos os anos estão associados à contaminação do ar em ambientes externos e fechados. Ainda segundo esse levantamento feito em 2018, 90% da população mundial respira ar contendo níveis elevados de poluentes (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2018).

No Brasil, houve um aumento de 14% de mortes causadas pela poluição do ar entre 2006 e 2016, tendo como principal causa as doenças isquêmicas do coração, sendo que os casos de morte por câncer de pulmão, traqueia, brônquios e doença pulmonar obstrutiva crônica

aumentaram nesse período. Além disso, os gastos do Sistema Único de Saúde apenas devido a internações por problemas respiratórios ultrapassaram 1,3 bilhão de reais no ano de 2018. (MORTES, 2019). Matéria recente publicada no BBC News Brasil, de autoria de Turbiani (2020), atribui à poluição ambiental o segundo maior perigo global atual à saúde humana, atrás somente da COVID-19, responsável por reduzir a expectativa média de vida em 1,9 ano, como concluído por estudo realizado em Chicago, Estados Unidos. Outro estudo recente também realizado neste país, por pesquisadores de Harvard, associaram um maior número de mortes pela Covid-19 a locais com concentrações maiores de material particulado respirável -  $MP_{2,5}$  (THOMAS, 2020; GREENSTONE; FAN, 2020; WU *et al.*, 2020).

Segundo estudo conduzido por Fajersztajn et al. (2013), publicado na revista *Nature Reviews Cancer*, longa exposição a material particulado, sobretudo o respirável ( $MP_{2,5}$ ), está fortemente associada ao risco de contrair câncer de pulmão. Há ainda uma maior preocupação com cidades grandes em países em desenvolvimento, como o Brasil, que combinam tanto emissões significativas de poluentes atmosféricos com o grande número de pessoas expostas. Assim, estima-se que, em 2050, a exposição à poluição do ar se tornará a principal causa de morte prematura a níveis globais, superando a malária e a má qualidade de água.

Nesse sentido, identificar os principais contaminantes e gerenciar suas fontes de emissão torna-se fundamental para prevenir os efeitos adversos da poluição atmosférica. Partindo desse objetivo, são definidos níveis minimamente seguros para a proteção da saúde da população, os quais são expressos em valores da concentração de cada poluente no ar. Dentre os principais poluentes além deste já mencionado, os de maior relevância face ao problema da poluição são o monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), ozônio ( $O_3$ ) e o material particulado de 10 e 2,5 micrômetros ( $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , respectivamente) (SILVA & VIEIRA, 2017).

A OMS, em inglês “*World Health Organization – WHO*”, como parte de sua atuação, publica recomendações dos níveis desejáveis para esses poluentes citados, com o objetivo de serem norteadores aos gestores ambientais de cada país na implementação de suas políticas de proteção à saúde e gestão da qualidade do ar. Essas recomendações, chamadas de “Guidelines”, apesar de terem aplicação global, devem ser adequadas às especificidades de cada país, cabendo aos governos observá-las na formulação de suas políticas. Os últimos Guidelines, do ano de 2005 (publicados no ano seguinte), atualizou os valores-guia para  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ ,  $O_3$  e  $SO_2$ . Já os

valores-guia para os poluentes CO e NO<sub>2</sub> não foram alterados em relação aos Guidelines do ano 2000 (SANTANA et al., 2012; WHO, 2006).

No Brasil, a gestão da qualidade do ar teve seu grande marco com a criação do Programa Nacional de Qualidade do Ar – PRONAR, por meio da Resolução CONAMA N° 5, de 15 de junho de 1989, como forma de atuar no controle, preservação e recuperação da qualidade do ar, conforme previsto na Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei N° 6.938, de 31/08/81.

Em Minas Gerais, o monitoramento da qualidade do ar é realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, que controla um total de 70 (setenta) estações automáticas, distribuídas em 20 (vinte) municípios do estado, incluindo a Região Metropolitana de Belo Horizonte, para a qual existem 21 (vinte e uma) estações. Os dados medidos são transmitidos para uma central, que os absorve e divulga na forma de um boletim diário.

Dessa forma, a gestão da qualidade do ar somente é possível com o monitoramento das concentrações dos poluentes de interesse, bem como o entendimento de suas interações e relações com os fenômenos meteorológicos.

## **2. OBJETIVOS**

**Geral:** Avaliar a qualidade do ar de Belo Horizonte e as correlações entre parâmetros de qualidade do ar (poluentes atmosféricos) e dados meteorológicos referentes ao ano de 2019.

**Específicos:**

- I) Avaliar as variações das concentrações dos poluentes ao longo do dia e dos meses do ano de 2019;
- II) Realizar análise estatística multivariada dos parâmetros de qualidade do ar e dados meteorológicos em busca de correlações.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Poluição Atmosférica

A atmosfera terrestre é uma camada de ar que envolve o planeta constituída de diversos gases, sendo os principais o nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), argônio (Ar) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), além de vapor de água, material particulado - orgânico e inorgânico-, e outros constituintes em menores concentrações. No entanto, quando se fala em ar atmosférico que tem tais constituintes como característica, trata-se de uma fina camada chamada de troposfera, a qual se estende até uma altitude que varia de 10 a 12 quilômetros. Esta camada é de extrema importância, visto que é responsável pelas condições climáticas da Terra e ocorrência dos fenômenos de poluição. Assim, a atmosfera como um todo é estruturada e subdividida conforme um gradiente térmico que varia com a altitude. Outra camada importante do ponto de vista ambiental é a estratosfera, onde se encontra a camada de ozônio, responsável por reter a radiação ultravioleta de alta energia proveniente do sol que chegam à superfície da Terra, possibilitando a existência e manutenção da vida (BRAGA, 2005).

A troposfera abarca duas camadas distintas: a primeira, conhecida como Camada Limite Planetária (CLP), está sujeita à influência da superfície terrestre sendo caracterizada como uma região turbulenta onde se observa o comportamento de variação da temperatura em virtude do aquecimento e resfriamento da superfície durante um ciclo diurno; já a segunda é conhecida como Atmosfera Livre (AL) (MORAES, 2013).

Considerando a atmosfera como um sistema dinâmico em que ocorrem diversas reações que tendem ao equilíbrio, a poluição atmosférica pode ser entendida como a alteração desse equilíbrio e, portanto, da composição natural da atmosfera pela presença de substâncias danosas ou em quantidade suficiente que traga efeitos prejudiciais para a população humana, para a fauna e flora (SILVA & VIEIRA, 2017). Segundo a Resolução CONAMA N° 491/2018, poluente atmosférico é:

Qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade.

São diversas as fontes de poluição atmosférica e suas classificações, a começar pela

Dessa forma, os poluentes atmosféricos são divididos em duas categorias: poluentes primários, aqueles emitidos na atmosfera diretamente de uma fonte, e poluentes secundários, originados a partir de reações de poluentes primários com compostos da atmosfera, geralmente sob ação da radiação solar. Com relação às diversas fontes e suas classificações, há a distinção entre fontes naturais, originadas de fenômenos biológicos e geoquímicos, e fontes antrópicas, que por sua vez são oriundas das atividades humanas. Com relação às primeiras, cabe citar o solo, a vegetação, os oceanos e os vulcões. Já as fontes antrópicas são comumente separadas entre fontes fixas (ou estacionárias) e fontes móveis, sendo estas os veículos e meios de transporte movidos a gasolina, diesel e álcool, enquanto aquelas envolvem os processos industriais e a queima de resíduos sólidos, por exemplo (BRAGA, 2005; LIMA *et al.*, 2012; LISBOA, 2014). Na sequência, será discutido acerca dos principais poluentes atmosféricos.

### 3.1.1 Material Particulado (MP)

Trata-se de partículas de material sólido e líquido que permanecem em suspensão no ar, visíveis ou invisíveis a olho nu. São poluentes primários ou secundários com origem variada, geralmente associada aos processos de combustão, produzidos por fontes fixas ou móveis, ou então naturais, por exemplo a dispersão do pólen. Alguns exemplos são: queima incompleta de combustíveis fósseis e seus aditivos, emissão oriunda de processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo e ainda, podem se formar na atmosfera a partir de outros gases como dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COVs) (BRAGA, 2005; LISBOA, 2014).

Os particulados são classificados conforme o tamanho, medido em razão do diâmetro, ainda que não apresentem necessariamente forma esférica. As Partículas Totais em Suspensão (PTS) abarcam o particulado com diâmetro inferior a 50 µm (micrômetros). Já as Partículas Inaláveis são subdivididas em grossas (MP<sub>10</sub>), com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm, e finas (MP<sub>2,5</sub>), com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm, estas também chamadas de partículas respiráveis (SILVA & VIEIRA, 2017).

A grande preocupação com relação aos materiais particulados é quanto à inalação e capacidade de penetração no organismo, estando fortemente associado a doenças respiratórias e cardiovasculares. Pinheiro *et al.* (2014) encontraram associação positiva entre poluição por MP<sub>10</sub> e risco relativo para morte no estado de São Paulo, analisando a influência da temperatura.

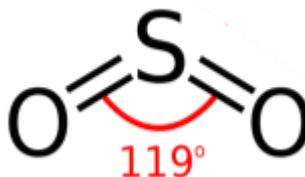
Sua concentração no ar depende das condições de dispersão atmosférica que, por sua vez, está associada a fatores meteorológicos. Nicodemos *et al.* (2010) afirmam que “condições meteorológicas distintas, mas com idênticas emissões de poluentes, poderão resultar em concentrações atmosféricas completamente diferentes”. Em estudo conduzido pelos autores na cidade de Uberlândia, em Minas Gerais, observou-se maiores concentrações de MP<sub>10</sub> no período do inverno, quando há condições desfavoráveis para dispersão e remoção de poluentes, havendo coincidência com os maiores números de atendimentos por problema do aparelho respiratório. Além disso, a concentração de MP<sub>10</sub> apresentou correlação inversa com as variáveis umidade relativa e precipitação e correlação direta com insolação (NICODEMOS *et al.*, 2010).

Outro estudo, também conduzido na cidade de Uberlândia, apontou para significância dos parâmetros umidade relativa e precipitação no índice de material particulado (MP<sub>10</sub>) presente no ar. Foi constatado que quanto maior a umidade relativa, melhor a qualidade do ar naquela cidade, conforme dados analisados no período de 2003 a 2008, pelo que se destaca:

para cada unidade de acréscimo na umidade relativa, espera-se, em média, 5,6% de acréscimo na probabilidade da qualidade do ar ser considerada boa e para cada 1 mm de precipitação, espera-se acréscimo de 3% na probabilidade da qualidade do ar ser boa (LEITE *et al.*, 2011).

### 3.1.2 Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)

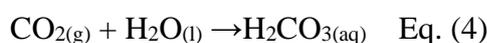
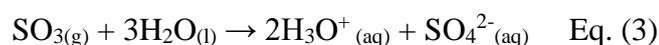
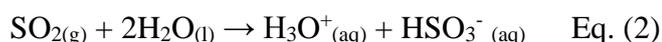
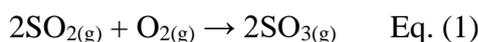
O Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) é um poluente primário quando proveniente da queima de combustíveis que contenham enxofre, seja nas atividades industriais ou em veículos automotores; ou secundário, quando formado na atmosfera pela combinação entre compostos sulfurosos e o oxigênio do ar. Pode também ser originado de processos biogênicos naturais, por exemplo pela oxidação de gases sulfurados liberados na decomposição de plantas (H<sub>2</sub>S), que é facilmente convertido a SO<sub>2</sub> na atmosfera, ou ainda liberado por atividade vulcânica (BRAGA, 2005; LISBOA, 2014; SILVA & VIEIRA, 2017). Sua fórmula estrutural pode ser vista na Figura 1 (p.19).

**Figura 1** – Fórmula estrutural do dióxido de nitrogênio

Fonte: Adaptado de Wikipedia (2021?)

Segundo Manahan (2013), o carvão é a principal fonte de dióxido de enxofre antropogênico, sendo que cerca de metade do enxofre no carvão se encontra na forma de pirita e a outra metade na fração orgânica. Na reação de combustão da pirita, por exemplo, quase todo enxofre é convertido a  $\text{SO}_2$  e somente uma pequena parte se transforma em  $\text{SO}_3$ . Ainda, é enfatizado que o controle do dióxido de enxofre é importante na medida que este possui grande potencial para induzir mudança climática, por serem responsáveis por parte da formação de aerossóis.

Esse poluente está associado principalmente ao fenômeno da chuva ácida, uma vez que, na atmosfera, ele oxida a  $\text{SO}_3$  e combina com a água, dando origem ao ácido sulfúrico – Equações 1 a 3. Apesar de o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), presente em maior concentração na atmosfera, também ser responsável pela acidificação das chuvas devido à formação do ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) – Equações 4 e 5, este é considerado um ácido fraco, além de que o  $\text{SO}_2$  é muito mais solúvel em água devido a polaridade da molécula (LISBOA, 2014; SILVA *et al.*, 2017).

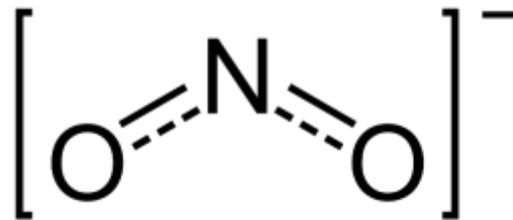


A velocidade de oxidação de  $\text{SO}_2$  é afetada sobremaneira pela presença de hidrocarbonetos e  $\text{NO}_x$  na atmosfera, uma vez que, juntamente com a radiação solar, formam o chamado Smog Fotoquímico, que será discutido adiante. As espécies oxidantes formadas por esse fenômeno são as principais responsáveis pela rápida oxidação de  $\text{SO}_2$ , o que ocorre de forma significativa no interior das gotículas dos aerossóis de água, ou seja, as reações são favorecidas na atmosfera em que se opera tal fenômeno (ALVES, 2005; MANAHAN, 2013).

### 3.1.3 Dióxido de Nitrogênio ( $\text{NO}_2$ )

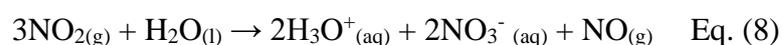
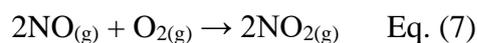
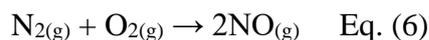
A principal fonte dos óxidos de nitrogênio são os processos de combustão, pela queima de combustíveis fósseis em fontes fixas ou móveis, desmatamentos (queimadas), atividade vulcânica e atividade bacteriana. O óxido nítrico (NO) é um poluente primário e, uma vez na atmosfera, reage com o oxigênio para a formação do dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), este sim um poluente secundário (LISBOA, 2014; SILVA & VIEIRA, 2017). Por ser um gás tóxico, reage com a pele e mucosas, provocando lesões celulares, podendo causar inflamações no sistema respiratório, desde o nariz até os alvéolos pulmonares (CÓNSUL *et al.*, 2004). A fórmula estrutural desse poluente pode ser vista na Figura 2.

**Figura 2** – Fórmula estrutural do dióxido de nitrogênio



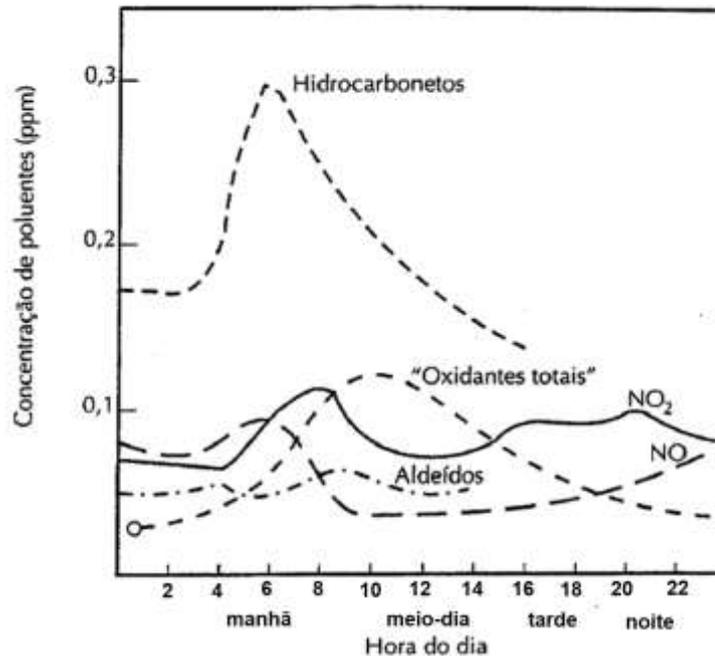
Fonte: Wikipedia (2021?).

Também, são precursores da chuva ácida, devido às reações na atmosfera que formam o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) – Equações 6 a 8, que pode ser removido por precipitação ou reagir com gases de natureza básica presentes na atmosfera, como a amônia. Além disso, o  $\text{NO}_2$  é um importante precursor do Smog Fotoquímico: “o dióxido de nitrogênio absorve eficientemente a radiação ultravioleta e é visível como ‘névoa marrom’ característica dos episódios de smog fotoquímico” (LISBOA, 2014). Trata-se de uma névoa que causa irritação aos olhos e mucosas formada pela interação de óxidos de nitrogênio com compostos orgânicos, como aldeídos e nitratos de alquila, o ozônio e nitrato de peroxiacila (PAN), um produto extremamente tóxico (CÓNSUL *et al.*, 2004).



Segundo Braga (2005), o pico de concentração do Smog Fotoquímico, que possui coloração marrom avermelhada, ocorre entre 10 e 12 horas. Na Figura 3 é indicada a distribuição diária da concentração dos poluentes fotoquímicos.

**Figura 3** – Variação da concentração de poluentes constituintes do smog fotoquímico ao longo do dia

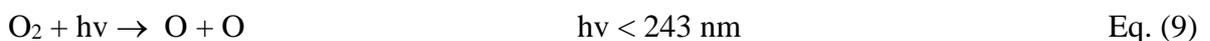


Fonte: Adaptado de Braga (2005)

A presença dos óxidos de nitrogênio na atmosfera está relacionada, além dos problemas já mencionados, à complexa relação e formação do ozônio troposférico, o que será discutido em detalhes no tópico seguinte.

#### 3.1.4 Ozônio ( $O_3$ )

É sabido da importância do ozônio na estratosfera formado a partir da absorção de radiação ultravioleta pelo oxigênio ( $O_2$ ) e sua consequente dissociação. Sua concentração máxima acontece entre 25 a 30 quilômetros acima da superfície, na conhecida camada de ozônio (MANAHAN, 2013). As equações 9 e 10 representam a formação do ozônio estratosférico:

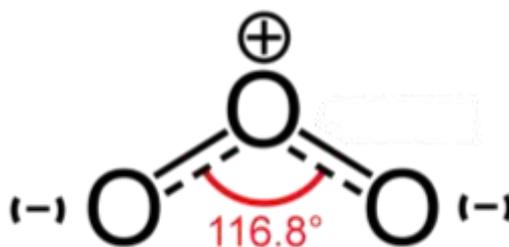


A camada de ozônio desempenha papel de extrema importância na atmosfera, uma vez que absorve grande parte da radiação ultravioleta emitida pelo sol (entre 97 a 99%) com comprimento de onda entre 150 a 315 nanômetros (nm), o que corresponde às faixas UV-B e UV-C, convertendo sua energia em calor. A radiação UV-C (cujo comprimento de onda varia entre 100 e 280 nm) é extremamente perigosa, capaz de destruir o DNA, sendo nociva aos

organismos unicelulares e às células da superfície de animais e plantas (BAIRD & CANN, 2011; MANAHAN, 2013).

Na troposfera, por outro lado, a presença do ozônio em altas concentrações não é benéfica, devido ao seu alto poder oxidante. É, portanto, considerado como um importante poluente secundário e representa a maior parte dos oxidantes fotoquímicos presentes nessa camada, formado a partir da interação entre os chamados “precursores de ozônio”, quais sejam: compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), os quais sofrem reações favorecidas por alguns fatores climáticos, como radiação solar e temperatura (BRAGA, 2005). A fórmula estrutural do ozônio pode ser vista na Figura 4.

**Figura 4** – Fórmula estrutural do ozônio



Fonte: Adaptado de Wikipedia (2021?).

- Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)

Os compostos orgânicos voláteis (COVs) são definidos como “compostos orgânicos que possuem ponto de ebulição até 130 °C na pressão atmosférica e podem contribuir na formação dos oxidantes fotoquímicos” (CONAMA, 2006). São emitidos por uma grande variedade de fontes, sendo que a principal fonte biogênica é a vegetação, que os libera como produto de processos metabólicos. As fontes antropogênicas são diversas, cabendo destacar a queima de combustíveis fósseis ou biocombustíveis nas emissões veiculares, processo de fabricação de produtos químicos, aterros industriais, refinarias de petróleo, indústrias petroquímicas, evaporação de solventes, distribuição de combustíveis, fumaça de cigarros e pinturas (SILVA, 2019).

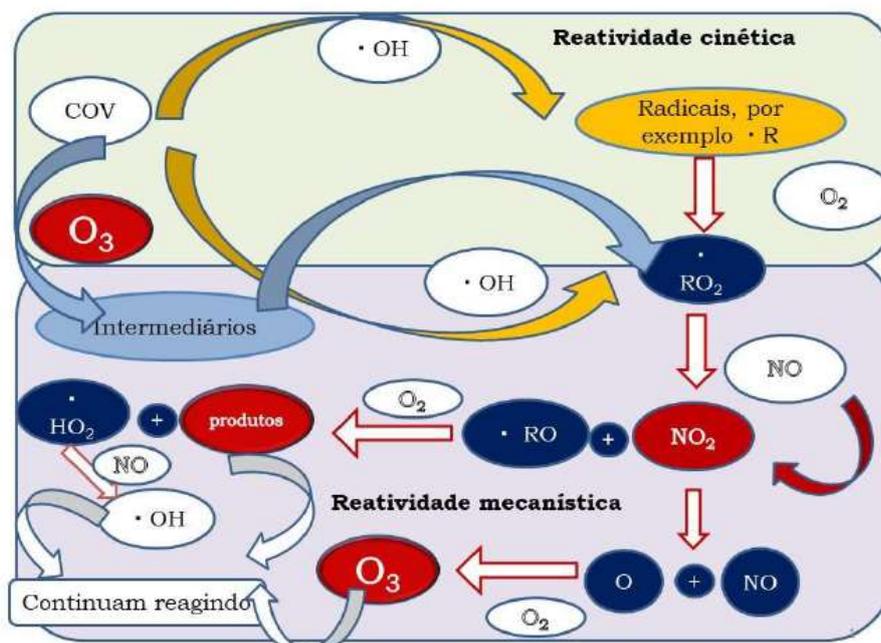
Ao grupo chamado de COVs incluem os hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres, sendo que os mais estudados são aqueles denominados “não oxigenados” – hidrocarbonetos – e os compostos carbonílicos (CC) – aldeídos e cetonas. Os hidrocarbonetos são subdivididos em alcanos, alcenos e aromáticos (destaca-se os BTEX) e suas fontes de

emissão podem ser naturais, por exemplo, o isopreno emitido pelas plantas, que representa 25% da emissão total de COVs na atmosfera e é extremamente reativo, ou seja, contribui para formação de ozônio e outros oxidantes. Já as fontes antropogênicas dos hidrocarbonetos são os processos de queima incompleta de combustíveis, tanto por veículos quanto por indústrias, evaporação de combustíveis e utilização de solventes. O grupo benzeno, etilbenzeno, tolueno e xilenos (BTEX) são em geral prejudiciais à saúde humana, sendo o benzeno um composto muito estável e considerado carcinogênico. O etilbenzeno e o tolueno são bastante reativos com o radical hidroxil, portanto contribuem consideravelmente para formação de aldeídos e  $O_3$  (MANAHAN, 2013; SILVA, 2019).

Com relação aos compostos carbonílicos (CC), ou seja, aldeídos e cetonas, sabe-se da presença no ar atmosférico de compostos como: formaldeído ( $CH_2O$ ), acetaldeído ( $C_2H_4O$ ), acroleína ( $C_3H_4O$ ), acetona ( $C_3H_6O$ ), propanona ( $C_3H_6O$ ), dentre outros. Os estudos a respeito desses compostos têm aumentado, visto que influenciam fortemente na formação de poluentes secundários, como o ozônio, e radicais livres, sendo que grande parte desses estudos são concentrados no formaldeído e acetaldeído, por serem mais abundantes. Suas fontes também podem ser naturais, por exemplo emitidos pelas plantas, animais e os vulcões, ou antropogênicas, como as indústrias, incineração de resíduos, queima de biomassa e as emissões veiculares (etanol anidro, a *blend* formada por gasolina e etanol, gás natural veicular (GNV) e a *blend* formada por diesel e biodiesel), sendo elas importantes contribuintes das emissões de formaldeído e acetaldeído (SILVA, 2019).

Silva *et al* (2017) explicam que existem duas escalas de reatividade dos COVs em seu potencial de formar ozônio: a cinética e a mecanística. A primeira depende da velocidade de reação dos COVs com radicais hidroxil ( $\bullet OH$ ), que é determinante no processo, enquanto a segunda, mecanística, traduz a capacidade de um determinado composto de formar ozônio, calculada a partir do número de moléculas de ozônio formadas por átomo de carbono agregado à mistura de COVs. Na Figura 5 é mostrado o esquema do mecanismo explicado.

**Figura 5** – Reações atmosféricas dos compostos orgânicos voláteis na formação de ozônio



Fonte: Silva *et al.* (2017).

Em estudo conduzido na região metropolitana do Rio de Janeiro, no ano de 2015, constatou-se que a distribuição e concentração de COVs variam conforme o local estudado devido ao uso de diferentes combustíveis, às diferenças climáticas e geográficas, as quais influenciam os movimentos de dispersão. No entanto, a comparação da relação de concentração tolueno/benzeno é interessante, visto que são características de emissões antropogênicas, emitidos por exaustão veicular, evaporação de combustíveis e solventes e queima de material orgânico. O isopreno, principal composto orgânico volátil emitido pela vegetação, é altamente reativo, mas tem uma menor contribuição no processo de formação de ozônio em ambientes urbanos, visto que se apresentam tipicamente em menores concentrações (SILVA *et al.*, 2017).

Corrêa *et al.* (2010) buscaram correlacionar os níveis de formaldeído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) e acetaldeído ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ) na atmosfera aos combustíveis utilizados no Brasil e seu potencial de formar ozônio troposférico. Esses compostos podem ser formados pela degradação fotoquímica de outros compostos orgânicos, que ocorre tipicamente à tarde, ou então emitidos como poluentes primários por veículos movidos a diesel e gás natural veicular comprimido e ainda veículos leves, que representam a principal fonte de aldeídos de manhã cedo. Observou-se uma redução nos níveis de formaldeído e acetaldeído no Rio de Janeiro para o período estudado (2004 a 2009), associada à melhoria da tecnologia dos processos de combustão de metano empregados na tecnologia de GNV e à evolução da tecnologia dos motores de maneira geral. Ainda assim,

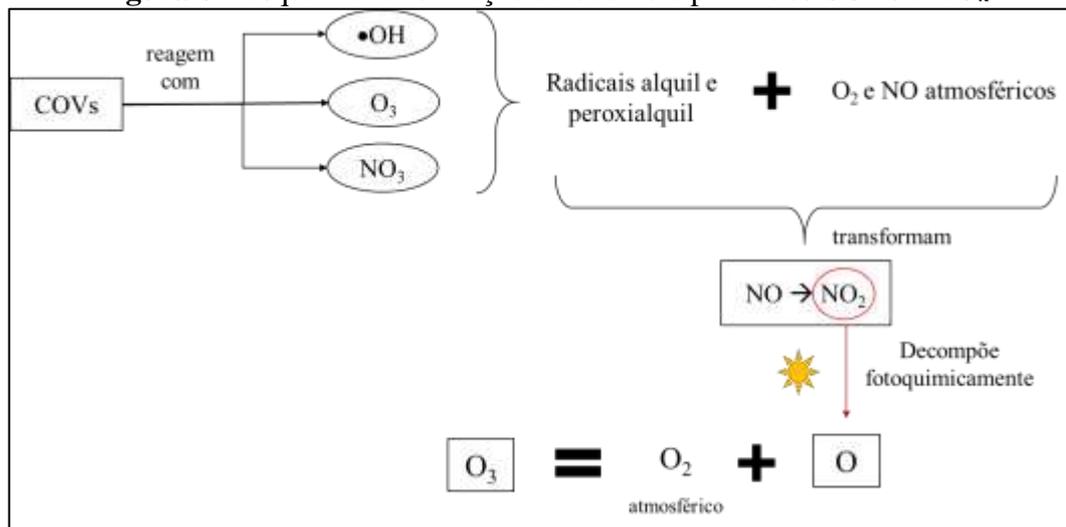
apesar da redução, foi possível constatar que os aldeídos, sobretudo o formaldeído, contribuem significativamente para a formação de ozônio.

Já Braga *et al.* (2019) avaliaram os níveis de COVs na Floresta da Tijuca (Mata Atlântica), no Rio de Janeiro, e constataram que os níveis de formaldeído e acetaldeído foram três vezes maiores na região urbana que na floresta, além de que não foi possível constatar correlação deles com as variáveis temperatura e radiação solar, indicando que os níveis desses compostos na floresta não são, neste caso, de fonte biogênica, mas sim transportados da área urbana. Apesar disso, o menor valor encontrado na floresta indica o importante papel das árvores em remover poluentes do ar. Dessa forma, concluiu-se no estudo que os níveis de formaldeído e acetaldeído apurados são atribuídos às emissões veiculares tanto de veículos leves movidos a etanol, etanol hidratado e gás natural comprimido quanto de veículos pesados movidos a biodiesel.

- Relação  $\text{NO}_x$  e COVs na formação de ozônio

O mecanismo fotoquímico completo de formação do ozônio troposférico envolve diversas reações químicas, portanto, é de alta complexidade. Simplificadamente, como representado esquematicamente na Figura 6, os COVs reagem na atmosfera com os radicais hidroxil ( $\bullet\text{OH}$ ), sendo esta a principal via de reação, com o próprio ozônio existente e radicais nitrato, formando outros radicais: alquil e peroxialquil. Estes, na presença de gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e óxido nítrico ( $\text{NO}$ ), levam à formação do dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), o qual se decompõe fotoquimicamente, liberando um átomo de oxigênio que, na presença de  $\text{O}_2$ , formam o ozônio (SILVA *et al.*, 2019).

**Figura 6** - Esquema de formação de ozônio a partir dos COVs e NO<sub>x</sub>

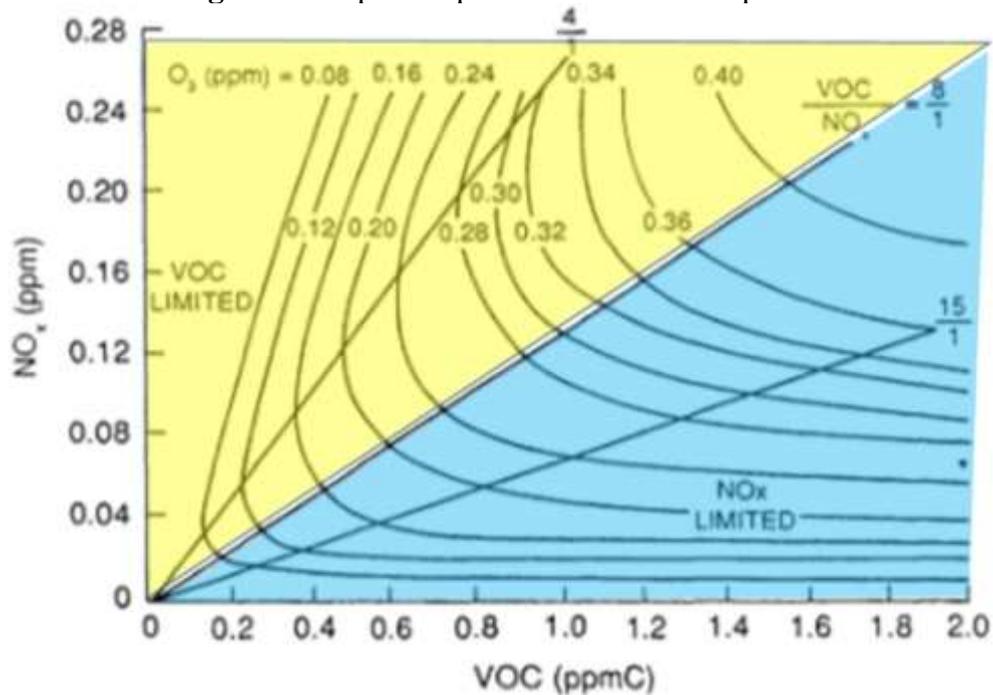


Fonte: elaborado pelo Autor

A relação da concentração desses dois poluentes na atmosfera com a formação de ozônio não é linear. Essa variação é representada pelas chamadas isopletas de ozônio, um gráfico em que a abcissa é assumida pela concentração de COVs em partes por milhão (ppm), enquanto no eixo da ordenada tem-se a concentração de NO<sub>x</sub>, também em partes por milhão. O cruzamento deles e, portanto, sua interrelação levam à formação de isolinhas que expressam uma concentração máxima (ou pico) de ozônio na atmosfera. Portanto, um ponto particular na isopleta de ozônio é definido pela razão COV/NO<sub>x</sub>. Esta relação é importante para o comportamento desse sistema principalmente para o entendimento de como a redução da concentração de COVs ou NO<sub>x</sub> afeta a concentração de ozônio (*NATIONAL RESEARCH COUNCIL*, 1991).

Na Figura 7, uma isopleta típica de ozônio usada pela *Environmental Protection Agency (EPA)* é mostrada.

**Figura 7** – Típica isopleta de ozônio usada pela EPA



Fonte: Adaptado de *National Research Council* (1991).

Na figura acima é possível notar uma reta diagonal tomada aqui como referência, a qual denota uma razão COV/NO<sub>x</sub> típica de 8:1, partindo da origem e dividindo o diagrama em duas metades. O desenho e formato das isolinhas de concentração de ozônio variam conforme uma série de fatores. É importante distinguir duas regiões formadas no gráfico: uma acima e à esquerda da reta de referência (destacada em amarelo) e outra abaixo e à direita da reta diagonal de referência (destacada em azul).

A região em azul possui valores altos para a razão COV/NO<sub>x</sub> e se caracteriza típica de áreas rurais ou subúrbios (áreas distantes do centro). Nessa região, para um valor constante de concentração do COVs (representado por [COVs]) ou para sua diminuição, diminuir também a concentração de NO<sub>x</sub> (representado por [NO<sub>x</sub>]) resulta em menores picos na concentração de ozônio. O sistema, dito como “controlado pelas concentrações de NO<sub>x</sub>” (*NO<sub>x</sub> limited*), é caracterizado por uma ampla oferta de radicais peróxidos que favorecem a conversão de NO a NO<sub>2</sub>, como já explicado. Dessa forma, em casos em que esse sistema opera, diminuir a disponibilidade de NO<sub>x</sub> ocasionará a diminuição da concentração de ozônio troposférico, uma vez que sua única fonte de formação está associada à fotólise de dióxido de nitrogênio (*NATIONAL RESEARCH COUNCIL*, 1991).

A região em amarelo, por sua vez, a razão COV/NO<sub>x</sub> apresenta valores baixos, sendo típica de áreas urbanas altamente poluídas. Para um valor constante da concentração de NO<sub>x</sub>, a diminuição de [COVs] resulta em menores picos na concentração de ozônio. No entanto, a diminuição de [NO<sub>x</sub>] para valores constantes de [COVs] ocasiona em maiores picos na [O<sub>3</sub>]. Por isso, o sistema é controlado pelas concentrações de COVs (*VOC limited*). Esse comportamento deve-se à complexa química envolvida na formação do ozônio troposférico. No cenário, o que ocorre é que o NO<sub>2</sub> compete efetivamente com os COVs pelo radical hidroxil, diminuindo a produção dos radicais peróxido. Assim, diminuindo as concentrações de óxidos de nitrogênio significa em maior disponibilidade de •OH para reagir com os COVs existentes na atmosfera, levando a uma maior formação de ozônio (*NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991*).

Silva *et al.* (2019) explicam que esse complexo comportamento é devido a vários efeitos:

*Em primeiro lugar a reação do O<sub>3</sub> com NO é rápida, levando ao consumo direto do ozônio. Além disso, nessas condições, o NO<sub>2</sub> reage com os radicais hidroxila, formando HNO<sub>3</sub>, terminando a cadeia de reações que levam à transformação de NO para NO<sub>2</sub> (e conseqüentemente formação de O<sub>3</sub>) e diminuindo a formação de radicais HO<sub>2</sub>, através da reação dos COVs com radicais hidroxila.*

Estudo recente realizado na cidade do Rio de Janeiro analisou o porquê dos níveis de ozônio permanecerem altos mesmo durante a paralização nacional de caminhoneiros ocorrida em maio de 2018. Foi constatado que, apesar da redução na emissão de poluentes primários, as concentrações de ozônio permaneceram altas, o que foi ocasionado pela redução dos níveis de NO<sub>x</sub> na atmosfera onde opera as condições do sistema “*VOC limited*”. Dessa forma, esse cenário sugere que o controle, assim como a especiação das emissões de COVs, é uma estratégia desejável, enquanto o foco em estratégias de diminuição da concentração de NO<sub>x</sub> em áreas onde tais condições são aplicáveis deve ser evitado ou pelo menos avaliadas com cautela (*DANTAS et al., 2019*).

### 3.1.5 Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor e inodoro, além de poluente primário oriundo principalmente de emissões de fontes móveis (veículos automotores), sendo que os veículos leves correspondem à cerca de 68% do total, enquanto os veículos pesados contribuem com cerca de 29%. Em horários de pico de tráfego, os níveis do gás na atmosfera podem atingir até 100 ppmv (partes por milhão em volume). Pode ser emitido ainda por processos industriais e

queima de resíduos. A degradação da clorofila libera CO nos meses de outono, o que corresponde a aproximadamente 20% das emissões totais em um ano, sendo também emitido pela decomposição de matéria vegetal (BAIRD & CANN, 2011; MANAHAN, 2013).

Segundo Lisboa (2014), trata-se do poluente mais abundante da troposfera e está associado a efeitos prejudiciais à saúde, causando estresse pelo aumento do nível de carboxiemoglobina no sangue, deficiência na capacidade psicomotora, dor de cabeça, tontura, alucinação e outros ainda mais graves, como angina, asfixia e morte. Em ambiente interiores, altas concentrações são preocupantes devido a seu efeito tóxico, sendo que a fumaça de tabaco é uma fonte significativa. Uma pequena porcentagem da hemoglobina ligada cronicamente como complexo de CO pode ser responsável por doenças cardíacas (BAIRD & CANN, 2011).

Na atmosfera, o monóxido de carbono é removido pelas reações com o radical hidroxil, ou ainda, pela atuação de microrganismos presentes no solo (MANAHAN, 2013).

### 3.1.6 Chumbo (Pb)

O chumbo (Pb) é um metal tóxico que pode ser emitido por fontes antropogênicas, geralmente, associado ao material particulado. Há alguns anos atrás, veículos automotores eram fontes emissoras significativas de Pb para a atmosfera pelo fato de os sais orgânicos tetrametilchumbo e tetraetilchumbo serem usados como aditivos para a gasolina, usados extensivamente na década de 1970. Grandes quantidades de haletos de chumbo eram emitidas, a qual é uma substância volátil o bastante para fugir do sistema de exaustão e formar particulados, podendo ser absorvidos pela pele. No entanto, com a substituição dos sais de chumbo pelo etanol como aditivo da gasolina, os níveis atmosféricos atuais de Pb já não são causam tanta preocupação quanto no passado. Outra forma de emissão do metal é durante a operação de reciclagem de baterias de carros feita sem os devidos cuidados (BAIRD & CANN, 2011).

No fígado, moléculas contendo chumbo são convertidas em neurotoxinas e, em doses razoáveis, podem causar sintomas que se assemelham à psicose, uma vez que as toxinas atravessam a barreira sangue-cérebro. Em caso de exposição muito alta, são fatais. (BAIRD & CANN, 2011). Está associado também à degeneração do sistema nervoso central e doenças nos ossos, principalmente em crianças (LISBOA, 2014).

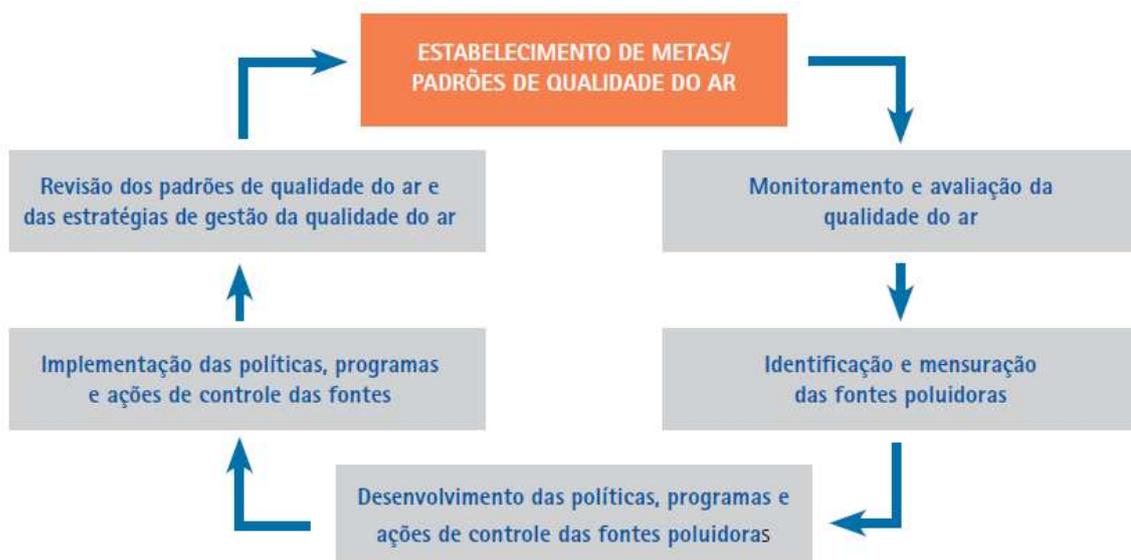
Manahan (2013) menciona estudo conduzido na Europa que conseguiu traçar a ascensão e queda dos compostos atmosféricos alquilados de chumbo, que mostraram tendência de

crescimento constante até a década de 1970, quando atingiu o pico, seguido por declínio constante devido à remoção gradual da gasolina aditivada com chumbo.

### 3.2 Padrões de Qualidade Do Ar

Os Padrões de Qualidade do Ar (PQAr) são definidos como valores-guia dados em termos da concentração de poluentes no ar que visam prevenir seus efeitos prejudiciais à saúde da população (SANTANA et al., 2012). Dessa forma, são essenciais na gestão da qualidade do ar, uma vez que norteiam os demais instrumentos, como esquematizado na Figura 8.

**Figura 8** – Importância dos Padrões de Qualidade do Ar na gestão da qualidade do ar



Fonte: Santana et al. (2012)

A Organização Mundial da Saúde (OMS) é órgão vinculado à Organização das Nações Unidas (ONU) que, dentre outras atividades, define diretrizes para condução de políticas públicas de saúde. No que tange à poluição atmosférica, publica recomendações (chamadas de *Guidelines*) quanto às concentrações ambientais de poluentes com o objetivo de subsidiarem os gestores ambientais de cada país na definição de seus próprios padrões (SANTANA et al., 2012).

Em 2005, ocorreu a última revisão dos “*Air Quality Guidelines*” pela OMS, os quais são concebidos a partir do conhecimento sobre as propriedades perigosas dos poluentes associadas ao risco de exposição a eles, amparado por pesquisas conduzidas por cientistas renomados de todo o mundo. Para revisão dos *Guidelines*, a OMS estabeleceu um grupo formado por diversos especialistas para liderar todo o processo, o que envolveu definição de escopo, da metodologia da atualização e indicação de outros especialistas para contribuir na revisão da literatura

científica. Além disso, foi formado um subgrupo composto por especialistas das áreas de epidemiologia, toxicologia, avaliação da exposição da qualidade do ar, gestão da qualidade do ar e políticas públicas, com a responsabilidade de elaborar uma primeira versão do documento. Uma vez aprovada, essa versão foi enviada a um grupo externo para revisão e, por fim, foi convocada uma reunião em outubro de 2005 com todo o grupo de trabalho para discutir e aprovar a revisão (WHO, 2006).

Segundo o documento, os padrões de qualidade do ar “são um importante instrumento de gestão de risco e política ambiental e devem ser estabelecidos em cada país para proteger a saúde de seus cidadãos”. Dessa forma, é destacado que os padrões devem ser adaptados à realidade de cada país, variando de acordo com a viabilidade tecnológica, considerações econômicas, além de fatores políticos e sociais, ou seja, será dependente do nível de desenvolvimento de cada país, da capacidade de gestão da qualidade do ar e outros fatores, que precisam ser considerados na formulação de políticas ambientais (WHO, 2006).

Na Tabela 1 encontram-se sumarizados os valores-guia (“*Air Quality Guideline – AQG*”), conforme última revisão realizada pela OMS.

**Tabela 1** – Valores-guia para cada poluente

<b>POLUENTE</b>	<b>TEMPO DE AMOSTRAGEM</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (µg/m<sup>3</sup>)</b>
PM <sub>2,5</sub>	1 ano	10
	Média 24 horas	25
PM <sub>10</sub>	1 ano	20
	Média 24 horas	50
O <sub>3</sub>	Média de 8 horas	100
NO <sub>2</sub>	1 ano	40
	1 hora	200
SO <sub>2</sub>	Média 24 horas	20
	Média de 10 min	500

Fonte: Adaptado de WHO (2005?).

Para o poluente Monóxido de Carbono (CO), foram mantidos os valores da revisão anterior, feita em 2000, conforme Tabela 2 (p. 31).

**Tabela 2** – Valores-guia para monóxido de carbono (CO)

TEMPO DE AMOSTRAGEM	CONCENTRAÇÃO (mg/m <sup>3</sup> )
15 min	100
30 min	60
1 hora	30
8 horas	100

Fonte: Adaptado de WHO (2000).

Segundo B.C (2010) *apud* por Santana et al. (2012), há várias abordagens para o estabelecimento e revisão de padrões de qualidade do ar, quais sejam: gestão de risco, que leva em conta diversos fatores, incluindo aspectos econômicos; baseado na ciência, uma abordagem mais protetiva e transparente para a saúde; referencial, que se baseia em padrões mais restritivos estabelecidos em outros locais; e redução da exposição, baseado na melhoria contínua pelo estabelecimento de metas de redução.

Santana et al. (2012) salientam ainda que há outros fatores que devem ser contemplados no processo de definição dos padrões de qualidade do ar, como critérios para aferição do seu atendimento em determinada região, além do modo de coleta, tratamento e disponibilização dessa informação tanto para o gestor quanto para a sociedade. Outros pontos destacados pelos autores são:

- Presença de um indicador ou índice com finalidade de informar sobre a situação da qualidade do ar;
- Tempo médio de amostragem para fins de monitoramento;
- Metodologia de monitoramento e os respectivos limites de detecção;
- Número de ultrapassagens aos padrões considerados aceitáveis;
- Nível de atenção para o qual devem ser tomadas medidas emergenciais de controle;
- Estratégia de medição;
- Procedimento de manuseio dos dados;
- Estatísticas utilizadas para obtenção do valor a ser comparado com o padrão;
- Cronograma para cumprimento dos padrões.

### *3.2.1 Legislação Aplicável*

No Brasil, o primeiro texto regulador visando ao controle da poluição atmosférica foi por meio da Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986, que estabeleceu um programa de controle da poluição veicular. Diante da necessidade de uma iniciativa que contemplasse as fontes fixas de poluição atmosférica, foi criado em 1989 o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar – PRONAR – por meio da Resolução CONAMA nº 05, de 15 de junho de 1989. O Programa definiu estratégias, como estabelecimento de padrões nacionais de qualidade do ar e de limites de emissão, por tipologia de fontes e poluentes prioritários, além de implementação de política de prevenção de deterioração da qualidade do ar, implementação da rede nacional de monitoramento do ar e desenvolvimento de Inventário Nacional de Fontes e Emissões. Também, foram definidas ações a serem cumpridas no curto, médio e longo prazos com vistas ao aprimoramento da gestão da qualidade do ar. Dessa forma, ficou instituído como um de seus instrumentos os Padrões de Qualidade do Ar (CONAMA, 1989; MMA, 2020?).

No ano seguinte foi publicada a Resolução CONAMA nº 03, de 28 de junho de 1990, que fixou os Padrões de Qualidade do Ar, conforme previsto no PRONAR. Essa resolução trouxe dois níveis de padrão, denominados como primário e secundário, sendo o primeiro definido como concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, enquanto padrão secundário abarca concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população e mínimo dano à fauna, flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Também foram definidos os métodos de amostragem e análise dos poluentes, cujo detalhamento foi atribuído ao INMETRO e ao IBAMA (CONAMA, 1990).

Os padrões definidos por essa resolução podem ser vistos na Tabela 3 (p.33).

**Tabela 3** – Padrão de qualidade do ar definido na CONAMA nº 03/90.

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	CONCENTRAÇÃO	
		PADRÃO PRIMÁRIO	PADRÃO SECUNDÁRIO
PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 horas	240	150
	Anual	80	60
FUMAÇA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 horas	150	100
	Anual	60	40
MP <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 horas	150	*
	Anual	50	
SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 horas	365	100
	Anual	80	40
CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - ppm)	1 hora	40.000 - 35	*
	8 horas	10.000 - 9	
O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1 hora	160	*
NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1 hora	320	190
	Anual	100	*

(\*) Igual ao padrão primário

Fonte: Adaptado de SANTANA et al. (2012).

Para os poluentes PTS, fumaça, partículas inaláveis e SO<sub>2</sub> foi permitido uma única ultrapassagem anual relativa aos padrões primários e secundários para a média de 24 horas. Já para o CO, também foi permitido uma ultrapassagem nos padrões primário e secundário de 8 horas e 1 hora, também para o ozônio (O<sub>3</sub>) uma vez ao ano. Para o NO<sub>2</sub> não foram permitidas ultrapassagens.

Segundo Santana et al. (2012), a referida resolução atribui aos estados o monitoramento da qualidade do ar, mas se verifica uma carência a nível federal de regulamentação quanto a aspectos do monitoramento de forma a criar uma uniformidade, por exemplo, na definição das diretrizes sobre localização, dimensionamento, operação, calibração, avaliação e revisão da rede de monitoramento, além de outros aspectos. Os autores destacam que tal lacuna, aliada a fatores de insuficiências na administração pública, têm efeito sobre a dificuldade na instauração da Rede Nacional de monitoramento da Qualidade do Ar a que se refere o PRONAR.

Após quase 30 (trinta) anos, houve revisão dos padrões de qualidade do ar que culminou na publicação da nova resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, baseada nos valores-guia definidos pela OMS em 2005. Conforme consta no seu artigo 4º, os Padrões de Qualidade do Ar serão adotados em quatro etapas sequenciais, para as quais são definidos três padrões intermediários (PI-1, PI-2, PI-3) e um final (PF). Para os poluentes monóxido de

carbono (CO), partículas totais em suspensão (PTS) e chumbo (Pb<sub>5</sub>) será adotado imediatamente o padrão final. Os padrões intermediários devem ser adotados considerando os Planos de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar, cuja elaboração é de responsabilidade dos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente (CONAMA, 2018). Os padrões adotados estão relacionados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Padrões de qualidade do ar fixados pela Resolução CONAMA nº 491/2018

POLUENTE	PERÍODO DE REFERÊNCIA	PI-1	PI-2	PI-3	PF
MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	120	100	75	50
	Média anual	40	35	30	20
MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	60	50	37	25
	Média anual	20	17	15	10
SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	125	50	30	20
	Média anual	40	30	20	-
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Média horária	260	240	220	200
	Média anual	60	50	45	40
O <sub>3</sub> (µg /m <sup>3</sup> )	8 horas *	140	130	120	100
Fumaça (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	120	100	75	50
	Média anual	40	35	30	20
CO (ppm)	8 horas *	-			9
PTS (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	-			240
	Média anual	-			80
Chumbo Pb <sub>5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Média anual	-			0,5

(\*) máxima média móvel obtida no dia

Fonte: Adaptado de CONAMA, 2018.

A elaboração do Plano de Controle de Emissões Atmosféricas pelos estados e Distrito Federal deverá ser feita, conforme Art. 5º, em até 3 anos da entrada em vigor da Resolução, ou seja, até o prazo de 19 de novembro de 2021. O plano deve conter a abrangência geográfica e regiões a serem priorizadas, a identificação das principais fontes de emissão e respectivos poluentes atmosféricos, e diretrizes e ações com respectivos objetivos, metas e prazos de implementação. Ele deve ser enviado para o Ministério do Meio Ambiente juntamente com os resultados alcançados na sua implementação no primeiro trimestre do quinto ano após publicação da resolução, ou seja, até 31 de março de 2023. Acompanhado do referido Plano, deve haver um relatório de acompanhamento, elaborado a cada 3 anos, o qual indicará necessidade de reavaliação (CONAMA, 2018).

Quanto ao Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar, o qual também deverá ser elaborado anualmente, deve conter os dados de monitoramento e a evolução da qualidade do ar, em linguagem acessível e executado de forma objetiva e didática. O seu conteúdo mínimo é previsto no Anexo II da Resolução:

- Resumo Executivo;
- Descrição das características da região do estado e do Distrito Federal: condições meteorológicas, uso e ocupação do solo, outras características relevantes;
- Descrição de rede de monitoramento;
- Poluentes atmosféricos monitorados;
- Redes de monitoramento;
- Tipos de Rede e Parâmetros Monitorados: redes automáticas e manuais;
- Metodologia de Monitoramento;
- Metodologia de Tratamento dos Dados;
- Representatividade dos Dados: redes automáticas e manuais;
- Representatividade espacial das estações;
- Descrição das fontes de poluição do ar;
- Considerações gerais sobre estimativas de emissão de fontes móveis e fontes estacionárias;
- Apresentação dos resultados quanto aos poluentes;
- Medidas de gestão implementadas;
- Referências legais e bibliográficas.

Está previsto também a elaboração de um Plano para Episódios Críticos de Poluição do Ar pelos órgãos ambientais estaduais e distrital, o qual visa estabelecer medidas preventivas que evitem graves e iminentes riscos à saúde da população, conforme Art. 10º da Resolução. Ele deve informar os responsáveis pela declaração dos níveis de criticidade, a qual deve ser divulgada em um meio de comunicação de massa. Os níveis de atenção, alerta e emergência para os poluentes são informados no Anexo III, relacionados na Tabela 5 (p.36). Conforme Art. 11º, as fontes de poluição do ar ficarão sujeitas às restrições previstas no Plano para Episódios Críticos de Poluição do Ar durante a permanência dos níveis de atenção, alerta ou emergência definidos.

**Tabela 5** – Níveis de atenção, alerta e emergência para cada poluente

NÍVEL	POLUENTES E CONCENTRAÇÕES					
	SO <sub>2</sub>	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>	CO	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>
	µg/m <sup>3</sup> (média de 24 h)			ppm (média móvel de 8 h)	µg/m <sup>3</sup> (média móvel de 8h)	µg/m <sup>3</sup> (média de 1h)
Atenção	800	250	125	15	200	1130
Alerta	1600	420	210	30	400	2260
Emergência	2100	500	250	40	600	3000

Fonte: adaptado de CONAMA, 2018.

Os dados de monitoramento da qualidade do ar devem ser divulgados na página da internet oficial de cada órgão ambiental estadual e distrital, bem como do Meio Ambiente, o que será feito por meio do Índice de Qualidade do Ar – IQAR, definido como “valor utilizado para fins de comunicação e informação à população que relaciona as concentrações dos poluentes monitorados aos possíveis efeitos adversos à saúde” (CONAMA, 2018). Segundo o Art. 13º, a equação para cálculo do IQAR encontra-se definida no Anexo IV, porém por problemas de revisão e publicação da Resolução, o anexo não contém a referida equação, somente a definição da faixa para a classificação de primeiro nível – “Boa” tanto em termos do IQAR, quanto em termos das concentrações dos poluentes, conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6** – Faixas definidas para a classificação “Boa” do IQAR

QUALIDADE	ÍNDICE	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2,5</sub>	O <sub>3</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
		µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	Ppm	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>
		24h	24h	8h	8h	1h	24h
BOA	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 -20

Fonte: adaptado de CONAMA, 2018.

Segundo previsto no Art. 8º da Resolução, o Ministério do Meio Ambiente deveria publicar, no prazo de 12 meses após entrada em vigor da Resolução, guia técnico abrangendo, dentre outros itens, a sistematização do cálculo do índice de qualidade de ar.

Publicado em 2019, o Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar traz, organizado em uma tabela, a estrutura do Índice de Qualidade do Ar, apresentado na Figura 9 (p.37).

**Figura 9** – Estrutura do Índice de Qualidade do Ar.

Qualidade do Ar	Índice	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24h	MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24h	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 8h	CO (ppm) 8h	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 1h	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 1h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 - Moderada	41 - 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 - Ruim	81 - 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	201 - 400	>250 - 600	>125 - 300	>200 - 800	>15 - 50	>1130 - 3750	>800 - 2620

Fonte: Brasil (2019).

Conforme documento, o cálculo do IQAR para cada poluente é dado pela Equação 11.

$$IQAR = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini}) \quad \text{Eq. (11)}$$

$I_{ini}$  = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa;

$I_{fin}$  = valor do índice que corresponde à concentração final da faixa;

$C_{ini}$  = concentração inicial da faixa em que se localiza a concentração medida;

$C_{fin}$  = concentração final da faixa em que se localiza a concentração medida;

$C$  = concentração medida do poluente.

Uma vez calculado o valor do índice para cada poluente, é selecionado aquele que produz maior valor do índice para o IQAR, o qual deve ser divulgado. Conforme Guia Técnico, a divulgação deve conter o local de monitoramento, a data e horário (se for o caso) e o poluente com maior índice, associado ao descritor de qualidade e à cor. Podem ainda ser divulgadas informações como os efeitos à saúde e medidas de prevenção, bem como causas para os valores incomuns do IQAR. A comunicação sobre os efeitos à saúde sugerida é apresentada na Figura 10 (p. 39).

**Figura 10** – Efeitos à saúde associados às faixas do Índice de Qualidade do Ar – IQAR.

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

Fonte: Brasil (2019).

- **ANÁLISE DA LEGISLAÇÃO**

Em maio de 2019, a Procuradoria Geral da República ajuizou no Supremo Tribunal Federal (STF), uma Ação Direta de Inconstitucionalidade contra a Resolução CONAMA nº 491/2018 atualmente vigente. Conforme alegado na Ação, a norma viola direitos fundamentais à informação, à saúde e ao meio ambiente, todos garantidos na Constituição Federal de 1988, pelo fato de ser incapaz de prover a proteção suficiente, adequada e eficaz a tais direitos. É argumentado que os Padrões de Qualidade do Ar enquanto

*peças centrais e decisivas para o sucesso das políticas públicas de promoção da melhoria da qualidade do ar, devem sempre refletir objetivamente os níveis mais protetivos à saúde da população segundo a ciência médica atual, ou ao menos conduzir a uma progressiva convergência com esses referenciais (BRASIL, 2019).*

A Procuradoria Geral da República reforça que os padrões atuais são muito permissivos em relação aos valores-guia da OMS e que, por isso, representam uma escolha do Estado pela desproteção à saúde da população e ao meio ambiente. É defendido que a falta de prazos entre os padrões intermediários (PI-1, PI-2 e PI-3) e o padrão final (PF) da Resolução estimula inércia e estagnação, além de que a norma “não estabelece de forma suficiente e adequada procedimentos e instrumentos de gestão para atingir os padrões finais pretendidos” por ela. Conclui-se que a Resolução CONAMA n ° 491/2018 é insuficiente enquanto política pública

que objetiva diminuir a poluição atmosférica, prejudicando os cidadãos pela sensação de falsa segurança gerada (BRASIL, 2019).

Siciliano et al. (2020), ao avaliarem os novos padrões definidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 em quatro estações no Rio de Janeiro, concluíram que os principais poluentes na contribuição de um maior IQAR na cidade foram o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ). Segundo os autores, apesar da inclusão do parâmetro  $\text{MP}_{2,5}$  ter sido uma importante contribuição da norma, em relação ao ozônio, por outro lado, o aumento do período médio de 1 hora para 8 horas na amostragem favorece o enquadramento em índices menores, sendo mais permissivo. Já em relação do  $\text{NO}_2$ , o Padrão Final assume concentrações de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para a classificação “boa”, para o qual valores acima foram detectados em somente 1,1% dos dias e em somente uma das estações analisadas. Comparado com o padrão adotado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro, cuja concentração para classificação “boa” é de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , as concentrações foram superiores em 58,7% dos dias. Os autores ressaltam que o Padrão Intermediário 1 (PI-1) é muito alto para todos os poluentes, acima das recomendações da OMS, o que, na ausência de uma data limite para evolução dos padrões intermediários com vistas a alcançar o Padrão Final, sugere alta permissividade e favorece um cenário que, na prática, é ineficaz na proteção da saúde pública.

### **3.3 Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar**

Segundo estudo organizado pelo Instituto Saúde e Sustentabilidade em 2019, foi realizado levantamento da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil, no período de outubro de 2018 e março de 2019. Conforme verificado, somente 7 unidades federativas das 27 realizam o monitoramento da qualidade do ar: Distrito Federal, Espírito Santo, Minas Gerais, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e São Paulo. Havia na época um total de 319 estações ativas, sendo a maioria concentrada na região sudeste (93,4%), seguida pela região sul (4,1%) e por fim as regiões centro-oeste e nordeste (1,3% cada). Do total, 52,8% são estações públicas, sendo que em São Paulo e no Distrito Federal todas elas são públicas, enquanto em Minas Gerais, 100% são estações privadas, adquiridas para fins de licenciamento. Com relação aos poluentes, o mais monitorado é o  $\text{MP}_{10}$  em cerca de 58% das estações, seguido pelo  $\text{NO}_x$  (39,2%),  $\text{O}_3$  (37,6%), PTS (29,5%),  $\text{SO}_x$  (26,6%), CO (25,1%),  $\text{MP}_{2,5}$  (20,4%), Fumaça (3,8%) e carbono negro (1,3%) (INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE, 2019).

No Estado de Minas Gerais, há um total de 70 (setenta) estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar administradas pela Fundação Estadual de Meio Ambiente - FEAM, sendo que 25 (vinte e cinco) delas encontram-se na região metropolitana de Belo Horizonte e outras 45 (quarenta e nove) estão distribuídas no restante do estado. As estações estão localizadas nas seguintes cidades: Barra Longa (3), Belo Horizonte (4), Betim (3), Brumadinho (6), Conceição do Mato Dentro (4), Congonhas (8), Contagem (1), Coronel Fabriciano (1), Ibirité (2), Ipatinga (4), Itabira (6), Itabirito (2), Mariana (1), Nova Lima (5), Ouro Preto (4), Paracatu (5), Pirapora (2), Rio Doce (1), São José da Lapa (4) e Timóteo (4). A localização das estações da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH - pode ser vista na Figura 11 (p.42).

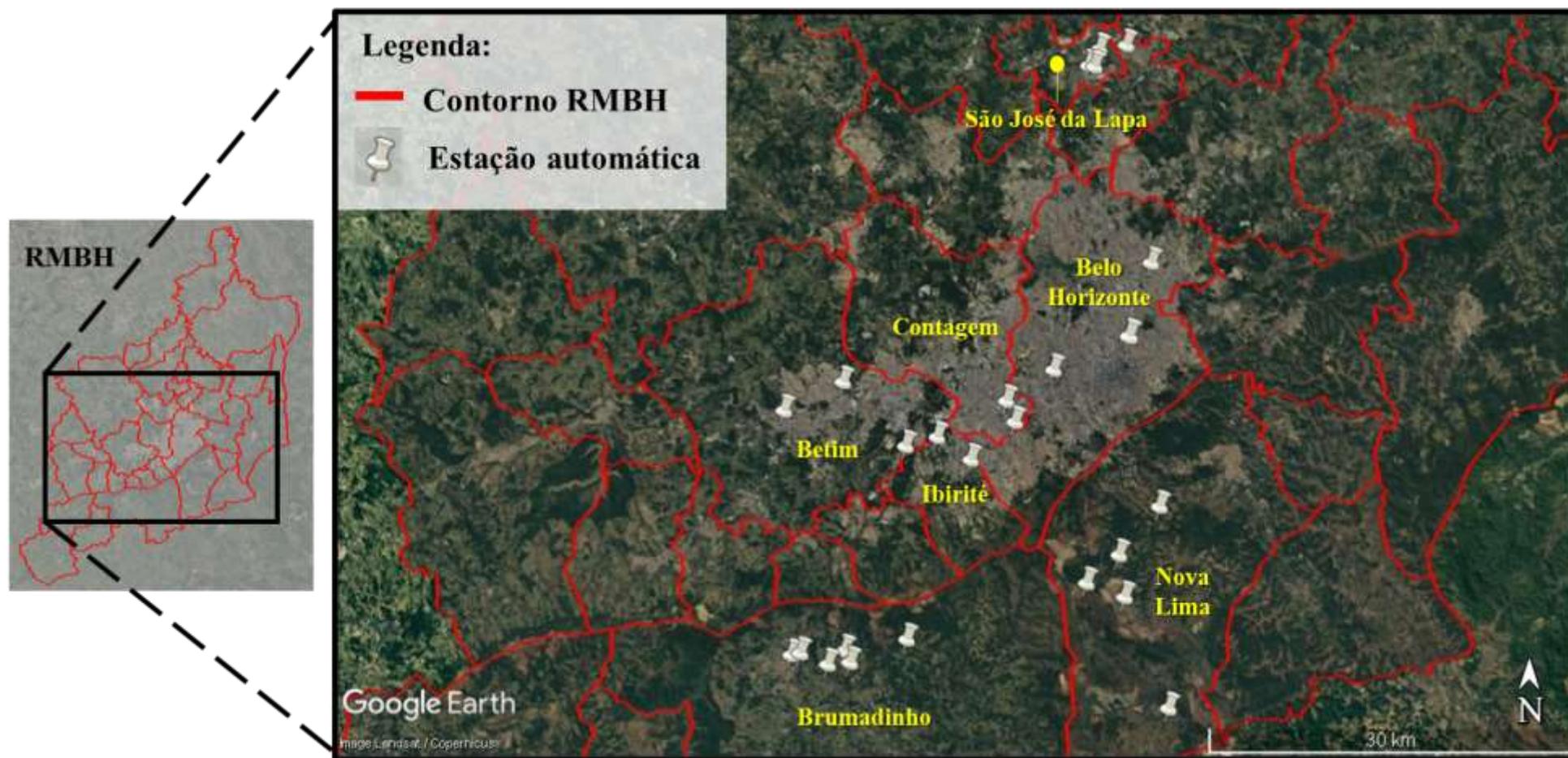
Segundo informação disponível no *site* oficial do órgão, as estações possuem monitor de partículas (PM<sub>2,5</sub>, e PM<sub>10</sub>) analisadores de gases e sensores meteorológicos, além de sistema de aquisição e transmissão de dados para uma central instalada na sede da FEAM, o que é feito por rede telefônica em tempo real. A metodologia utilizada para cada poluente é apresentada no Quadro 1. Ainda, conforme informado, os equipamentos, de origem francesa, foram adquiridos em atendimento a condicionante de licença ambiental de empresas ou como medida compensatória de dano ambiental (FEAM, 2020?).

**Quadro 1** – Métodos de amostragem de poluentes monitorados pelas estações automáticas

<b>POLUENTE</b>	<b>MÉTODO</b>
Partículas Inaláveis – PM <sub>2,5</sub>	Monitor Beta
Partículas Respiráveis – PM <sub>10</sub>	
Dióxido de Nitrogênio – NO <sub>2</sub>	Quimiluminescência
Monóxido de Carbono – CO	Filtro de correlação em infravermelho
Ozônio troposférico – O <sub>3</sub>	Fotometria por Ultravioleta
Dióxido de Enxofre – SO <sub>2</sub>	Fluorescência por Ultravioleta

Fonte: FEAM (2011).

Figura 11 – Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar na RMBH



Fonte: Adaptado de Google Earth.

Com relação aos dados meteorológicos, há equipamentos para medição de temperatura, índice de precipitação, direção e velocidade dos ventos, incidência de radiação solar e umidade relativa, os quais podem ser vistos na Figura 12. Os dados são extraídos pelos equipamentos (Figura 13) de forma automática e transmitidos para uma central. A FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente, responsável pelo monitoramento, trata os dados e os divulga na forma do Boletim Diário de Qualidade do Ar.

**Figura 12** – Estação Automática Fixa de monitoramento de dados meteorológicos e de qualidade do ar (Estação CMMR – RMBH)



Fonte: Autor.

**Figura 13** – Equipamentos no interior da estação de monitoramento



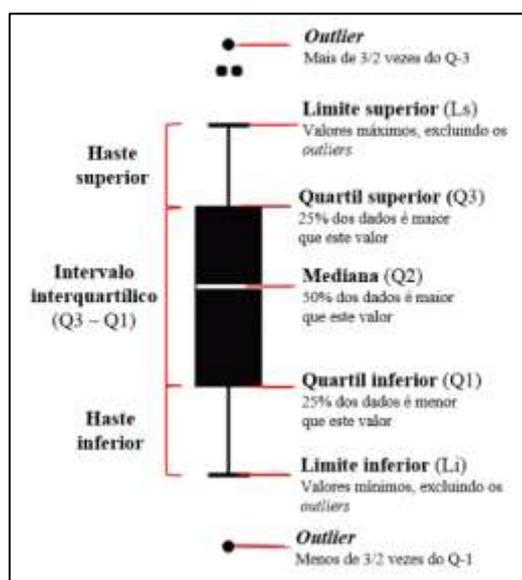
Fonte: Autor.

### 3.4 Análise Estatística

#### 3.4.1 Boxplots

O *boxplot* trata-se de um recurso visual que exhibe a mediana, quartis e valores pontuais máximos e mínimos e pode assumir uma configuração horizontal ou vertical. Sua estrutura é formada por uma caixa (*box*), uma linha dentro dela que simboliza a mediana, ou segundo quartil (Q2), e uma haste que representa justamente os valores limite, inferior e superior, do conjunto de dados (Figura 14). A mediana, por definição, divide o tamanho da amostra na metade e sua posição simétrica na caixa a aproxima da média aritmética, enquanto a posição assimétrica simboliza sua aproximação de valores chamados não-paramétricos, os sejam, que estão mais próximos do quartil inferior ou quartil superior. Já as alturas da caixa e da haste simbolizam as medidas de dispersão ou variabilidade (VALLADARES NETO et al., 2017).

**Figura 14** – Informações contidas no *boxplot*



Fonte: VALLADARES NETO et al., 2017.

#### 3.4.2 Estatística Multivariada – HCA e PCA

Segundo Vicini (2005), a estatística univariada é destinada à análise de variáveis de maneira isolada, enquanto a multivariada analisa de forma conjunta. Chama-se atenção que ela não se presta somente a confirmações, por se tratar de uma análise exploratória de dados, mas sim gera hipóteses ou ainda pode ser utilizada como confirmação dos eventos. Como destaca a autora, os métodos da análise de agrupamento hierárquico e a análise de componentes principais são interessantes de serem empregados quando se busca verificar como as amostras se

relacionam, isto é, o quanto elas são semelhantes, segundo um agrupamento de variáveis analisadas.

O objetivo da análise de agrupamentos é encontrar e separar objetos em grupos similares, por meio de uma variedade de técnicas e algoritmos. Dessa forma, os indivíduos são reunidos em grupos onde exista homogeneidade ou heterogeneidade, propondo uma estrutura de classificações ou hierarquias. O produto gráfico dessa classificação é chamado de dendrograma ou fenograma, ou ainda, “gráfico em árvore”, o qual sintetiza a informação. Apesar de haver uma pequena perda, o gráfico mostra-se útil para a classificação, comparação e discussão dos agrupamentos (VICINI, 2005; MINGOTI, 2005).

Convém destacar que, para a aplicação do método, convém realizar uma padronização dos dados, o que consiste em um pré-tratamento que busca aglomerar as amostras removendo a influência das diferentes unidades de medida, uma vez que elas podem afetar o grau de similaridade entre os objetos, ou seja, uma vez procedida à padronização, as variáveis terão a mesma contribuição no cálculo do coeficiente de similaridade entre objetos (VICINI, 2005; MINGOTI, 2005).

Convém mencionar que existem diferentes coeficientes de medida de distância que podem ser empregados no método. A mais utilizada para análise de agrupamentos é a distância euclidiana, a qual também foi empregada também neste trabalho. Seu inconveniente é ser influenciada pela escala, ou seja, a unidade de medida de cada variável, o que é contornado por meio da padronização das variáveis de estudo, conforme explicado no parágrafo acima.

Os gráficos em árvore produzidos pelo método do HCA podem ser representados de duas formas: horizontal ou verticalmente. Neste trabalho, optou-se pela representação vertical. Nesse tipo de dendrograma, faz-se a leitura da direita para a esquerda, no qual o eixo horizontal (eixo X) representa os grupos unidos por ordem decrescente de semelhança, enquanto o eixo vertical (eixo Y) representa as distâncias entre os grupos formados. Quanto menor a distância euclidiana (observada no eixo Y), maior a semelhança entre as variáveis e os agrupamentos formados.

Levando-se em consideração o grande número de dados, a análise de componentes principais (PCA) é extremamente bem-vinda, pois se trata de uma técnica estatística que tem o objetivo de condensar os dados com a menor perda de informação possível. Esta metodologia transforma um conjunto de variáveis originais em outro conjunto que é denominado de componentes

principais, com a mesma dimensão do original, por meio de um agrupamento dos indivíduos (cada amostra) que compõem esse conjunto de acordo com sua variação, ou seja, seu comportamento dentro da população (conjunto) (VARELLA, 2008; MINGOTI, 2005).

Uma vez encontrados os componentes principais (CP), deve-se retirar da análise aqueles que possuem pouca informação, de modo a tornar os resultados mais fáceis de serem interpretados. Um dos critérios de seleção do número de componentes principais que farão parte da análise é o método gráfico, chamado neste trabalho de “Gráfico de Distribuição de Componentes Principais”, o qual representa, no eixo Y, a porcentagem de variação explicada pela componente e, no eixo X, tem-se os autovalores em ordem decrescente. Uma das recomendações, segundo Vicini (2005), é utilizar as componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70%. Após seleção das componentes principais que serão analisadas, são produzidas as dispersões gráficas, ou planos fatoriais, nas quais é possível um exame visual dos agrupamentos formados num sistema de coordenadas criado pelos fatores. Dessa forma, as variáveis formam grupos por similaridades de explicação e, quanto mais distante da origem, maior a representatividade da variável naquela componente avaliada.

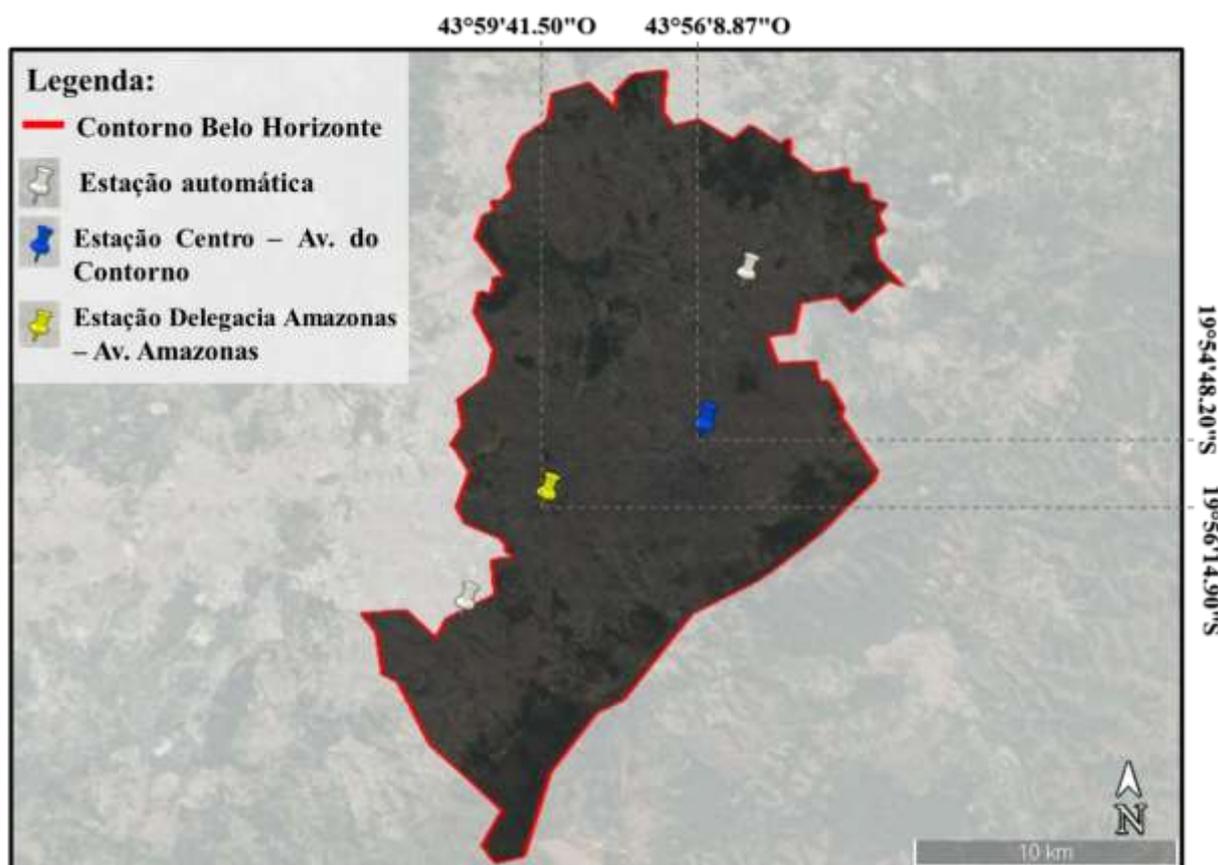
Dessa forma, foram utilizadas as análises estatísticas em busca de correlações que permitisse avaliar a qualidade do ar em Belo Horizonte.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Local de Estudo e Obtenção de dados

Este estudo utilizou dados do ano de 2019 de duas estações de monitoramento da qualidade do ar que fazem parte da rede de monitoramento da Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM). As estações de monitoramento selecionadas estão alocadas nas regionais Centro-Sul e Oeste do município de Belo Horizonte, sendo a primeira localizada no Batalhão de Rondas Táticas Metropolitanas (ROTAM), na Avenida do Contorno, nº 777, bairro centro, enquanto a segunda localizada no 5º Batalhão de Polícia Militar, na Avenida Amazonas, nº 6455, bairro Gameleira, portanto ambas estão em importantes avenidas da cidade que possuem grande circulação de veículos, como pode ser visto na Figura 15.

**Figura 15** – Localização estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2020).

Os poluentes medidos pelas estações automáticas são material particulado respirável e inalável (MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>, respectivamente), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>) e monóxido de carbono (CO). Já os dados meteorológicos fornecidos pelas estações

são temperatura, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar e umidade relativa. Os dados brutos foram obtidos no portal online da FEAM e se encontram disponíveis para amplo acesso no endereço eletrônico: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/dados>. Os dados são separados por cidade, ano e por estação, sendo que cada arquivo corresponde à uma planilha Excel (formato “.csv”). Convém mencionar que tanto os poluentes quanto os parâmetros meteorológicos (distribuídos em colunas) são registrados a cada hora, ou seja, há um conjunto de 24 dados por dia para cada um deles (distribuídos em linhas), entre às 0h30min e 23h30min. Destaca-se que, embora ambas as estações selecionadas para este estudo tenham capacidade de monitorar todos os parâmetros citados, houve dias e horários em que um ou mais poluentes não foram medidos. Como já mencionado neste trabalho, os dados são extraídos pelos equipamentos de forma automática e transmitidos para uma central, controlada pela FEAM, que os disponibiliza na internet.

Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais, possui uma área de aproximadamente 331 quilômetros quadrados e população estimada para 2020 de mais de 2 milhões e meio de habitantes, com densidade demográfica de 7.167 hab/Km<sup>2</sup>. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM – é de 0,810, segundo dados de 2010 (IBGE, entre 2000 e 2010).

Belo Horizonte está a cerca de 860 metros acima do nível do mar, apresentando um clima tipicamente tropical, com inverno seco e ameno e verão quente e úmido. O clima do município apresenta dois períodos do ano bem definidos, sendo um deles marcado pela temporada chuvosa, que se estende de outubro a março, e outra seca, de abril a setembro. Os meses de maio e setembro são considerados de transição. A precipitação média anual é de cerca de 1.500 milímetros (mm), considerando dados de 1981 a 2010, sendo que historicamente o mês mais chuvoso é dezembro e o mais seco ocorre em julho, enquanto a média de dias chuvosos na capital mineira é de 98 dias. Com relação à umidade relativa do ar, a média anual é de 67,3%, atingindo o maior valor em dezembro (74,5%) e o menor valor em agosto (58,4%), porém pode atingir valor abaixo de 30% por algumas horas nos meses de junho, julho, agosto e setembro. A temperatura média anual é de 21,8 °C, atingindo valores médios máximos no mês de fevereiro (23,8°C) e valores médios mínimos em julho (19,1 °C). Com relação aos ventos, possuem direção predominantemente para Leste (INMET, 2015). As informações climatológicas foram resumidas na Tabela 7 (p.49).

**Tabela 7** – Normal climatológica de Belo Horizonte – 1981 a 2010

Meses do Ano	Temperatura			Umidade Relativa (%)	Precipitação Acumulada (mm)	Pressão Atmosférica (mb)	Insolação (horas)
	Temperatura Média (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)				
Janeiro	23,4	28,4	19,8	73,0	329,1	1013,2	176,0
Fevereiro	23,8	29,0	19,9	70,0	181,4	1014,1	190,8
Março	23,4	28,5	19,7	71,4	198,0	1014,1	194,9
Abril	22,5	27,7	18,6	69,2	74,7	1015,4	210,7
Maiο	20,5	25,8	16,4	67,4	28,1	1017,5	221,2
Junho	19,3	24,8	15,0	66,2	9,7	1020,0	229,9
Julho	19,1	24,7	14,7	62,4	7,9	1020,8	240,5
Agosto	20,3	26,1	15,7	57,8	14,8	1019,8	241,5
Setembro	21,6	27,4	17,1	60,4	55,5	1017,2	202,5
Outubro	22,6	28,1	18,5	64,1	104,7	1014,9	196,5
Novembro	22,7	27,7	18,9	70,5	239,8	1013,3	166,9
Dezembro	22,9	27,8	19,4	74,0	358,9	1012,9	153,3

Fonte: INMET (2020?)

#### 4.2 Tratamento de dados e análise estatística

Foram construídos gráficos da distribuição das concentrações dos poluentes ao longo do ano de 2019, tanto da amostra completa como da amostra tratada, no programa Excel da Microsoft®. Com relação ao segundo, foi realizado um tratamento para cada poluente, conforme descrito no Quadro 2, de modo que fosse possível analisar de modo mais claro tal distribuição face aos padrões definidos na Resolução CONAMA nº 491/2018.

**Quadro 2** – Tratamento realizado nos dados brutos de poluentes para geração de gráficos de distribuição ao longo do ano

Poluente	Tratamento realizado <sup>(1)</sup>
Material Particulado – MP <sub>10</sub>	Média de 24 horas
Material Particulado – MP <sub>2,5</sub>	
Dióxido de enxofre – SO <sub>2</sub>	
Dióxido de nitrogênio – NO <sub>2</sub>	OBS <sup>(2)</sup>
Ozônio – O <sub>3</sub>	Máxima média de 8 horas obtida no dia
Monóxido de carbono – CO	

(1) Conforme Anexo I da resolução CONAMA Nº 491/2018

(2) Não foi necessário realizar tratamento, visto que o período de referência para NO<sub>2</sub> já corresponde à média horária fornecida pelos dados brutos.

A média simples dos dados foi calculada conforme a Equação 12:

$$\text{Média} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que:

$a_i$  = valor assumido na  $i$ -ésima posição;

$n$  = número de valores

Com o intuito de discutir acerca das variações sazonais, foi realizada uma seleção dos dados dos seis poluentes estudados para cada estação do ano e gerados gráficos de *boxplot* no programa Excel. Dessa forma, foram escolhidos os meses de janeiro (verão), abril (outono), julho (inverno) e outubro (primavera).

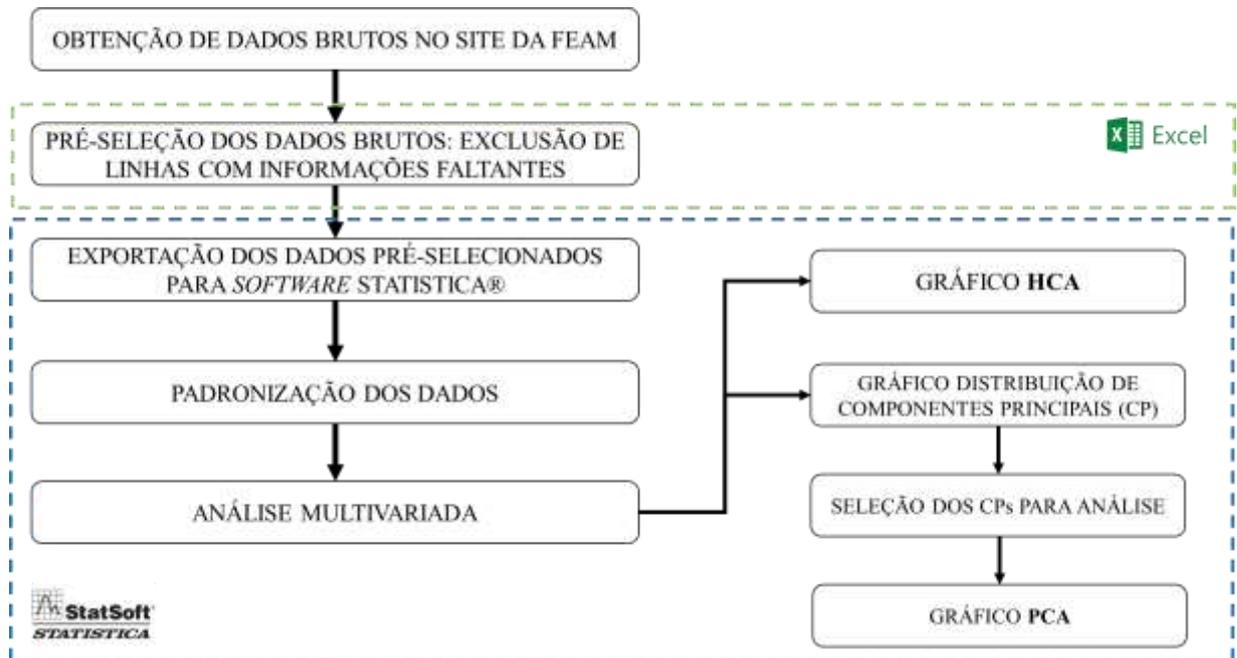
Em seguida, os dados de poluentes (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e CO) e dados meteorológicos (temperatura, velocidade e direção dos ventos, precipitação, radiação solar e umidade relativa) foram analisados com auxílio de ferramentas estatísticas empregando os softwares STATISTICA®, versão 10 da Statsoft Inc. e o Excel versão 2016 do Microsoft Office.

Foram avaliadas correlações univariadas por meio da correlação de Pearson e multivariadas com os métodos de classificação do tipo agrupamento hierárquico (HCA) e análise de componentes principais (PCA). Destaca-se que, para o primeiro, o método de ligação utilizado foi completo e a distância euclidiana. Sendo assim, foram confeccionados os gráficos de HCA e PCA para cada estação empregando o STATISTICA®, em busca de correlações dos poluentes entre si e entre eles e os parâmetros meteorológicos. Convém ressaltar que, com o objetivo de obter um melhor resultado, fez-se uma pré-seleção dos dados brutos, excluindo-se as linhas em que houvesse no mínimo um dado faltante. Dessa forma, foram considerados 1.820 conjuntos (dados) para a primeira estação, abrangendo o período de janeiro a junho, e 3.959 para a segunda estação, abrangendo o período de janeiro a dezembro, uma vez realizada a pré-seleção dos dados brutos.

Ressalta-se que o desenvolvimento do gráfico de PCA, realizado de maneira automática no *software* STATISTICA®, inclui o cálculo de uma matriz de correlação R, a obtenção de autovalores e autovetores e, por fim, as combinações lineares, ou seja, as novas variáveis chamadas de componentes principais. Foram utilizadas neste trabalho as três primeiras componentes principais, tendo em vista que a inclusão da quarta não contribuiu substancialmente na discussão dos resultados. Além disso, assim como para a análise de agrupamento hierárquico, ressaltar-se a utilização dos dados padronizados na análise de componentes principais, devido à maior garantia de que todas as variáveis tenham o mesmo grau de importância.

Um fluxograma que reúne as etapas realizadas para a análise estatística dos dados, desde sua obtenção até geração dos gráficos de análise, pode ser visualizado na Figura 16.

**Figura 16** – Fluxograma de trabalho para análise estatística



Fonte: elaborado pelo autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estatística Descritiva

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentadas as medidas de síntese dos dados brutos pré-selecionados das estações localizadas na Avenida Amazonas e na Avenida do Contorno, respectivamente.

**Tabela 8** – Estatística descritiva dos dados da Estação Av. Amazonas

	Estação - Av. Amazonas					
	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Mediana	Moda
MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	21,74	13,55	3,00	144,00	18,00	17,00
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	16,11	12,15	0,27	70,67	0,68	13,17
O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	75,57	74,15	0,11	332,23	23,48	26,56
SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	4,46	2,44	0,58	16,07	4,37	0,88
MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	11,87	8,05	1,00	76,00	10,00	6,00
CO (ppm)	0,75	0,30	0,06	2,35	0,68	0,67
Temperatura (°C)	23,94	4,18	10,90	35,06	23,48	24,84
Direção dos Ventos (°)	205,49	130,24	0,15	359,86	226,72	338,18
Precipitação (mm)	0,14	1,09	0,00	20,60	0,00	0,00
Velocidade dos Ventos (m/s)	1,48	0,77	0,17	4,53	1,46	0,35
Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> )	204,15	278,59	0,00	1076,64	17,68	0,00
Umidade Relativa (%)	65,75	16,41	24,00	99,00	66,00	75,00

**Tabela 9** - Estatística descritiva dos dados da Estação Av. do Contorno

	Estação - Av. do Contorno					
	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Mediana	Moda
MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	40,01	30,69	2,06	366,48	33,03	28,93
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	9,65	10,76	0,10	71,60	5,82	1,84
O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	23,02	20,10	0,35	125,72	17,90	2,67
SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0,88	1,18	0,05	26,38	0,54	0,1
MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	11,30	10,28	2,00	164,00	9,00	6,00
CO (ppm)	0,44	0,24	0,01	2,18	0,39	0,38
Temperatura (°C)	25,50	4,66	11,66	38,00	25,24	23,99
Direção dos Ventos (°)	135,87	75,57	0,02	359,85	116,65	115,98
Precipitação (mm)	0,11	0,95	0,00	31,00	0,00	0
Velocidade dos Ventos (m/s)	1,59	0,69	0,12	4,24	1,53	1,17
Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> )	221,49	302,77	0,00	1158,38	18,05	1,12
Umidade Relativa (%)	57,52	17,99	13,64	100,00	57,17	65,37

Observa-se uma diferença relevante nas médias para os parâmetros de  $MP_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$  e  $SO_2$ , comparando uma estação com a outra. Com exceção do poluente  $MP_{10}$ , todos os demais apresentaram valores médios maiores na estação da Avenida Amazonas. Já com relação aos parâmetros meteorológicos, os valores apresentados foram próximos em ambas as estações, com exceção da umidade relativa, que foi cerca de 8% maior na primeira estação. Destaca-se que os valores de desvio padrão apresentados, em ambos os casos, para quase todos os parâmetros analisados, aproxima-se muito ou ainda supera o valor da média, indicando uma alta dispersão dos dados, o que é lógico dada a variação grande que ocorre entre o dia e a noite.

Com relação aos materiais particulados, observa-se que o  $MP_{10}$  atinge o valor máximo fixado para a média aritmética anual ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do Padrão Intermediário 1 (PI-1) na estação da Av. do Contorno, esta cujos dados abarcam todo o ano de 2019. Já na estação da Av. Amazonas, não é possível fazer uma avaliação frente à Resolução CONAMA nº 491/2018, visto que os dados selecionados abrangem somente metade do ano analisado. No entanto, proporcionalmente, o valor médio calculado corresponde a cerca da metade do valor fixado pela referida norma. Avaliando o valor de média aritmética anual fixado para o Padrão Final (PF), que corresponde ao preconizado pela OMS, ambas as estações o ultrapassam. Analisando o material particulado respirável ( $MP_{2,5}$ ), ambas as estações apresentaram valores médios anuais abaixo do valor fixado para o PI-1 ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), porém acima do PF ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Com relação ao dióxido de nitrogênio, os valores médios anuais estiveram bastante abaixo do valor fixado para o Padrão Final ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e, conseqüentemente, para os demais.

Quanto ao ozônio ( $O_3$ ), apesar de não haver uma referência anual, observa-se que os valores médios apresentados para ambas as estações estiveram abaixo do valor fixado para o PI-1 ( $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). No caso da Avenida do Contorno, nem mesmo o valor máximo apresentado ( $125,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ultrapassa esse limite. Já na estação da Avenida Amazonas, o valor de máximo para o ozônio ultrapassou consideravelmente o limite do PI-1.

Já com relação ao dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), assim como para o  $NO_2$ , os valores médios anuais estiveram abaixo do valor fixado para o Padrão Intermediário 3 – o último deles ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e, conseqüentemente, para os demais.

Com relação ao monóxido de carbono (CO), o limite fixado na Resolução CONAMA nº 491/2018 é de 9 partes por milhão (ppm). Observa-se que os valores médios em ambas as

estações estiveram abaixo de um décimo desse valor, enquanto os valores máximos apresentados também se encontram abaixo do limite.

Os valores obtidos para o ano de 2019 estão em consonância com dados de anos anteriores, os quais apontam para o fato de que, historicamente, na cidade de Belo Horizonte, os poluentes  $MP_{10}$  e  $O_3$  são os dois que extrapolam os padrões, sendo que, à época do último Relatório de Qualidade do Ar, do ano de 2013, o padrão ainda era ditado pela Resolução CONAMA nº 03/1990 (FEAM, 2016).

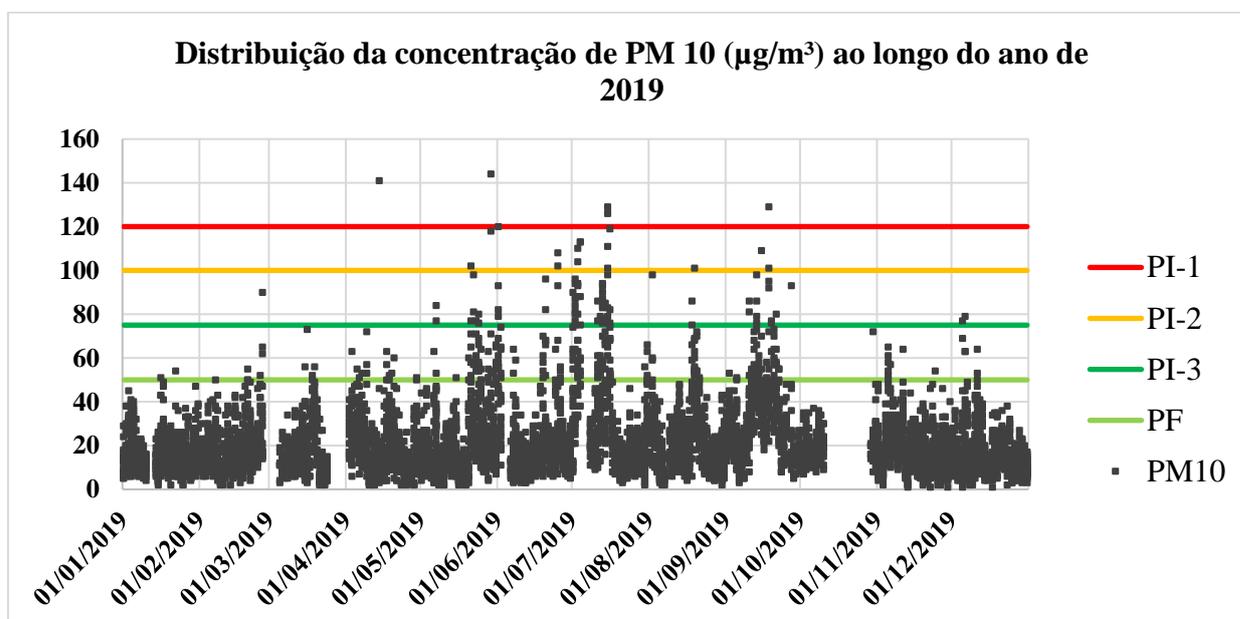
Com o intuito de facilitar uma análise espacial dos dados brutos de poluentes, são apresentados na sequência os gráficos de dispersão ao longo do ano de 2019.

## 5.2 Gráficos de Dispersão

### 5.2.1 Material Particulado Inalável - $MP_{10}$

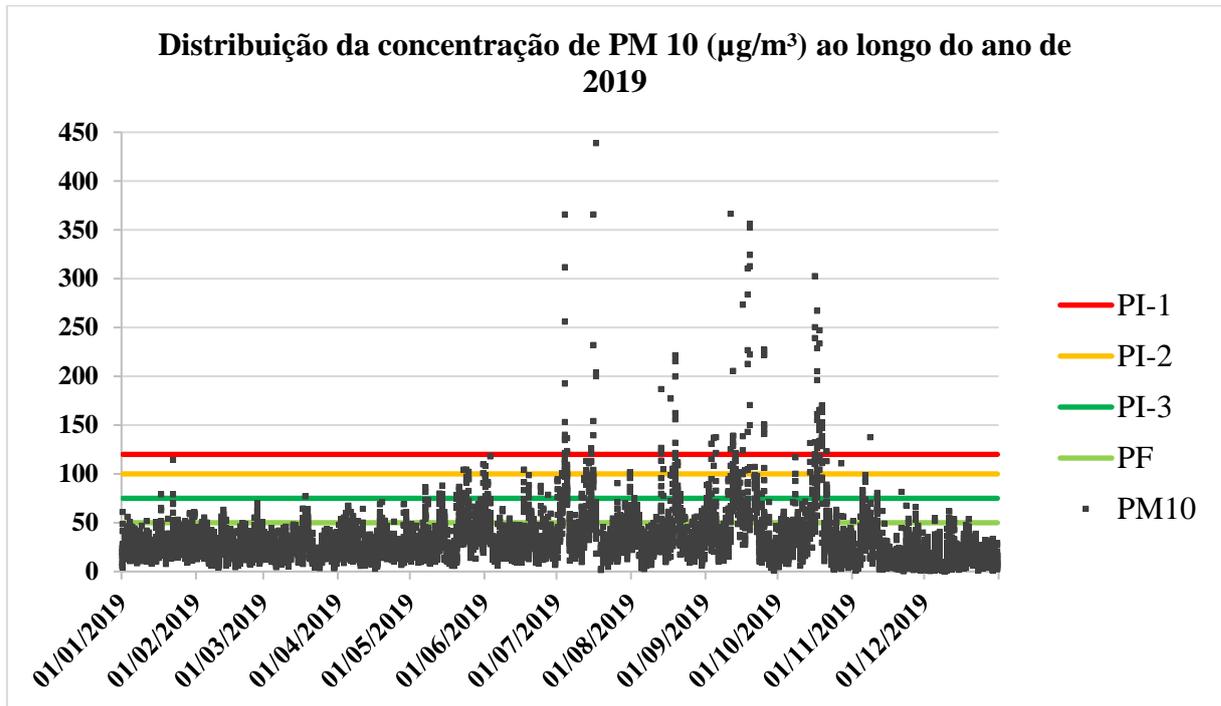
Nos Gráficos 1 e 2 (p. 55) é apresentada a dispersão do Material Particulado inalável ( $MP_{10}$ ) ao longo do ano de 2019, para as estações da Avenida Amazonas e Av. do Contorno, respectivamente, considerando os dados brutos.

**Gráfico 1** - Dispersão dos dados de  $MP_{10}$  da estação localizada na Av. Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 2 - Dispersão dos dados de MP<sub>10</sub> da estação localizada na Av. do Contorno**



Fonte: O autor.

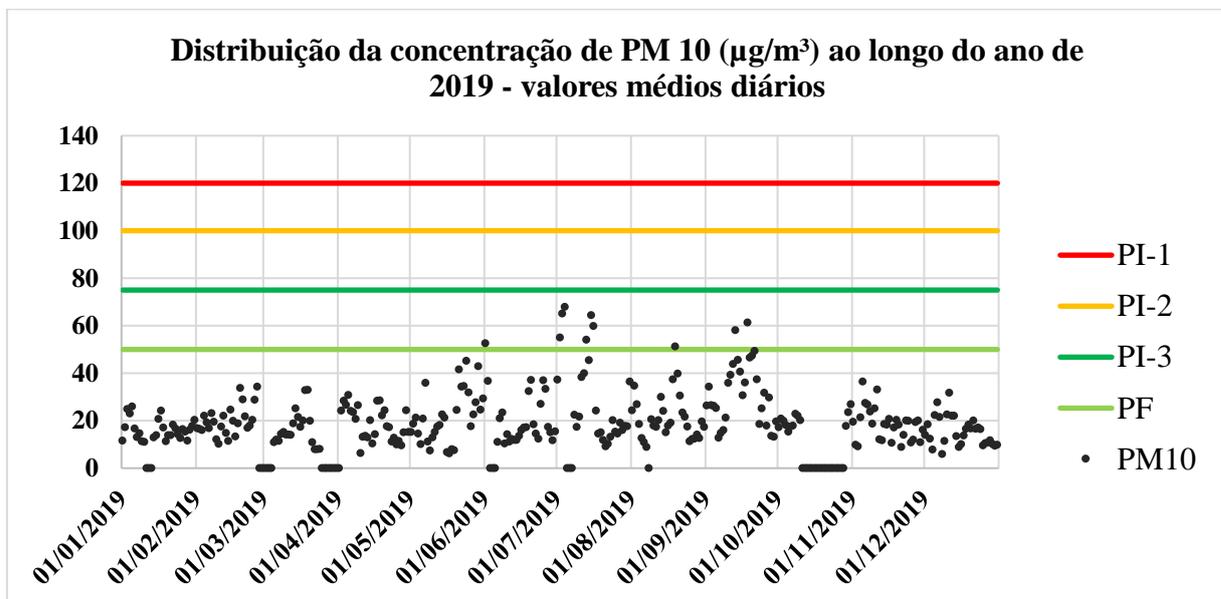
Primeiramente, observa-se que, apesar de ambas as avenidas serem de grande fluxo de veículos, a escala da concentração do poluente é muito diferente entre as estações: é nítido que na Avenida do Contorno foram atingidos picos muito maiores em relação à Avenida Amazonas, com um valor de máximo próximo de 440 µg/m<sup>3</sup>. Além disso, a distribuição permite observar que no meio do ano, entre os meses de junho e outubro, em ambas as estações as concentrações do material particulado foram maiores, comparadas com o restante do ano. Esse período coincide justamente com a estação seca, cujas condições meteorológicas são desfavoráveis para a dispersão e deposição do poluente (FEAM, 2016). Com menores umidades, há maior permanência do material particulado em suspensão na atmosfera, principalmente os de menor granulometria. Também, pode-se inferir que o aumento da concentração desses poluentes na atmosfera possa ser afetado pelo fenômeno da inversão térmica atuando na cidade de Belo Horizonte de forma a contribuir para esse cenário, fenômeno comum nessa mesma época do ano.

Santos, Carvalho e Reboita (2016) ao avaliarem a influência das condições meteorológicas nos dias com alta concentração de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro entre 1998 e 2008, também verificaram maiores valores no período do inverno, entre junho e agosto. Segundo as autoras, a Região Sudeste do Brasil está, nesse período, sob forte influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), sistema esse que contribui para a

formação de inversões térmicas na atmosfera. A condição de céu claro, com ventos fracos e a subsidência do ar inibe a formação de nuvens, sendo desfavorável à dispersão de poluentes. No trabalho, foi possível identificar que dos dias cujo Padrão Nacional de Qualidade do Ar vigente na época foi ultrapassado, 87% deles estiveram sob influência do ASAS e que 60% deles estiveram entre os meses de maio e setembro, período este que se assemelha aos dados do ano de 2019 em Belo Horizonte. Além disso, em cerca de 95% desses dias não foi registrado precipitação, o que desfavorece a remoção do poluente por via úmida.

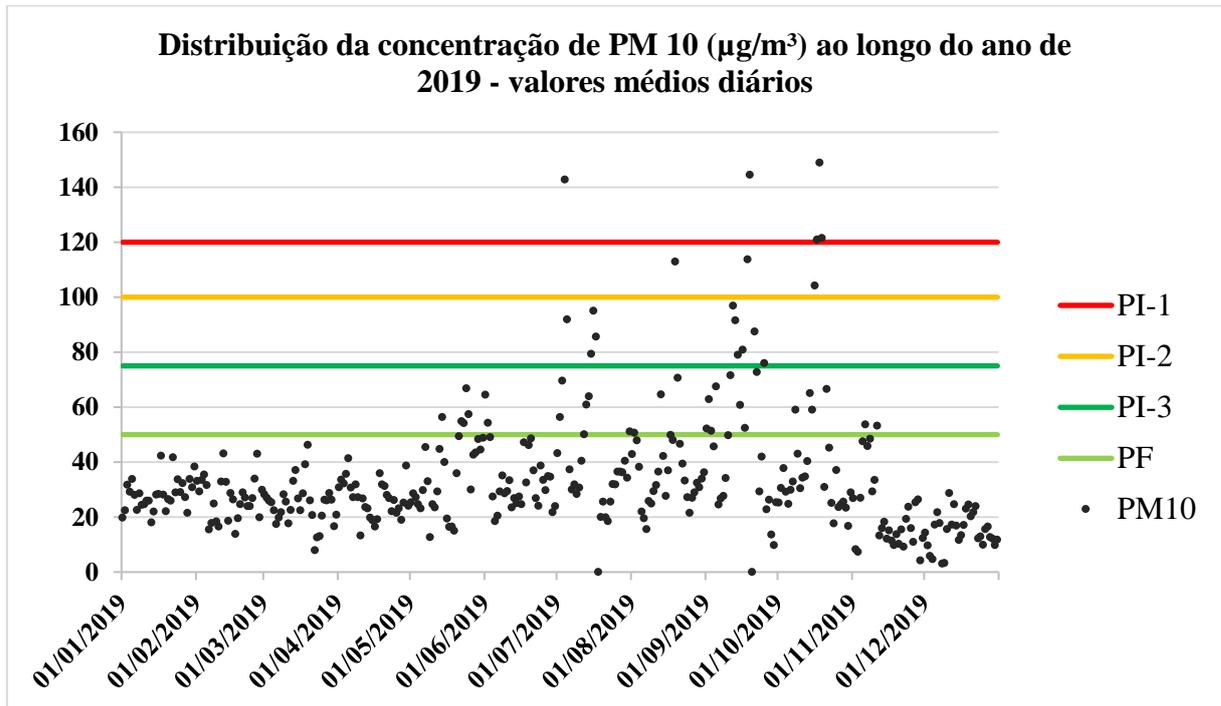
Os Gráficos 3 e 4 (p.57) dizem respeito à distribuição do mesmo poluente, porém após realizado o cálculo da média diária.

**Gráfico 3 - Distribuição dos valores médios diários de MP<sub>10</sub> na Avenida Amazonas**



Fonte: O autor.

**Gráfico 4 - Distribuição dos valores médios diários de MP<sub>10</sub> na Avenida do Contorno**



Fonte: O autor.

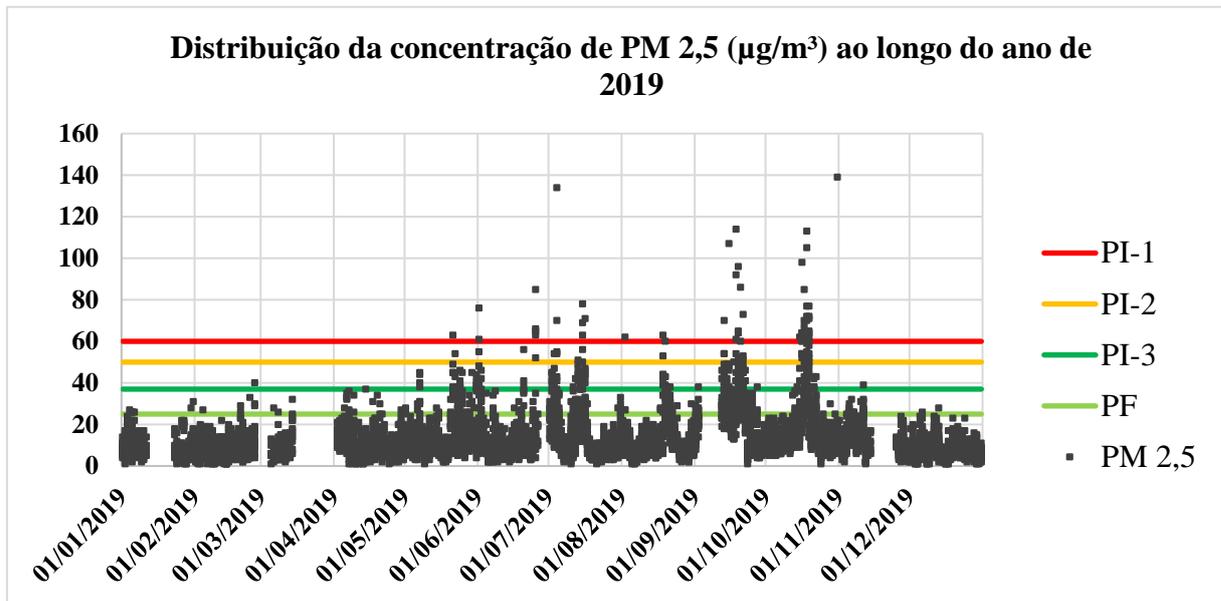
Conforme apresentado no Gráfico 3, todos os valores médios diários da concentração de material particulado inalável (MP<sub>10</sub>) na estação da Avenida Amazonas estiveram dentro do Padrão Intermediário 1 (PI-1) de 120 µg/m<sup>3</sup> fixado na Resolução CONAMA nº 491/2018, atualmente vigente. No entanto, considerando o Padrão Final (PF) que fixa o limite de 50 µg/m<sup>3</sup>, valor este preconizado pela OMS, em 10 (dez) dias do ano ele foi ultrapassado, considerando a média dos dados, entre os meses de junho e setembro.

Já com relação à estação localizada na Avenida do Contorno, conforme apresentado no Gráfico 4, apesar de grande parte dos valores médios diários estarem abaixo do Padrão Final (PF), houve mais dias no ano em que ele foi ultrapassado, ao todo 48. Já em relação ao Padrão Intermediário 1 (PI-1), seu limite foi ultrapassado em 5 dias do ano nos meses de julho (143 µg/m<sup>3</sup>), setembro (145 µg/m<sup>3</sup>) e outubro (121, 149 e 121 µg/m<sup>3</sup>). Os resultados são piores no período seco porque o material particulado permanece suspenso no ar por mais tempo, por isso a importância do processo de deposição úmida promovido pela precipitação (ALVES, 2005).

### 5.2.2 Material Particulado Respirável - MP<sub>2,5</sub>

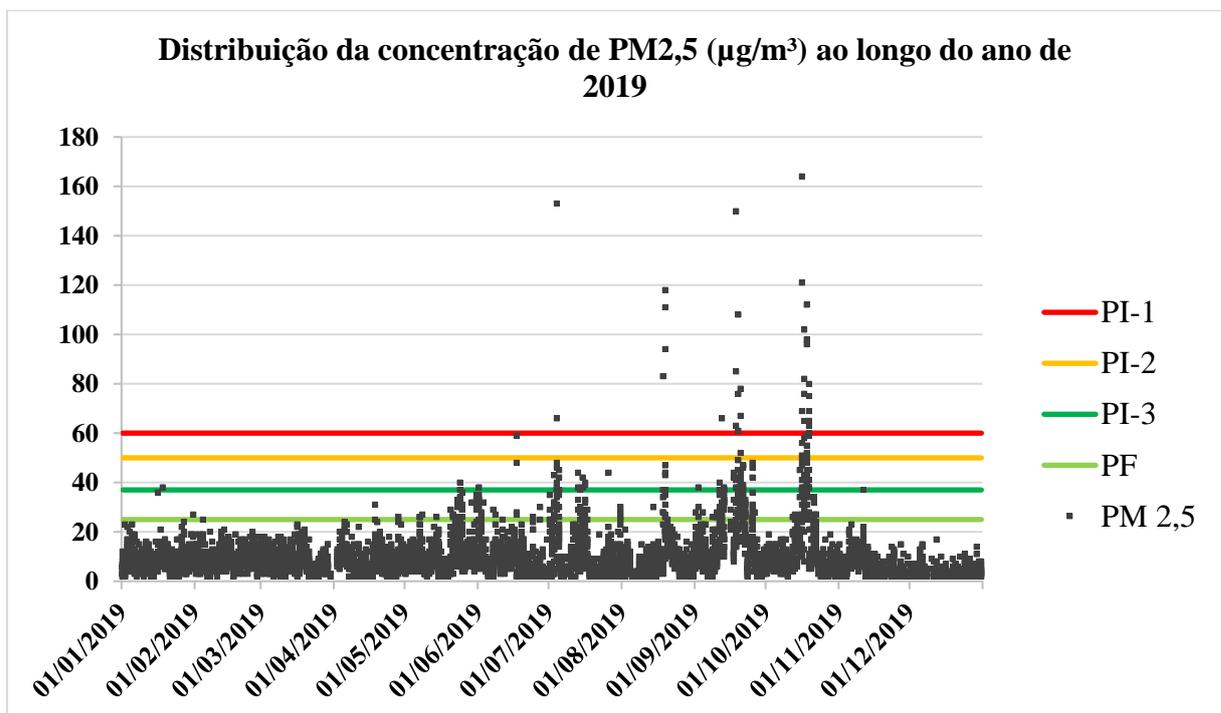
Nos Gráficos 5 e 6 (p. 58) é apresentado a dispersão do Material Particulado respirável (MP<sub>2,5</sub>) ao longo do ano de 2019, para as estações da Avenida Amazonas e Av. do Contorno, respectivamente.

**Gráfico 5** - Distribuição dos dados de  $MP_{2,5}$  da estação localizada na Av. Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 6** - Distribuição dos dados de  $MP_{2,5}$  da estação localizada na Av. do Contorno



Fonte: O autor

É possível observar um comportamento semelhante do material particulado respirável em relação ao inalável para as estações de estudo: maior concentração do poluente na época de seca. No entanto, distintamente do que comentado para o  $MP_{10}$ , há uma maior similaridade

entre os dados das duas estações. Em ambas, nota-se dois picos maiores nos meses de setembro e outubro de 2019.

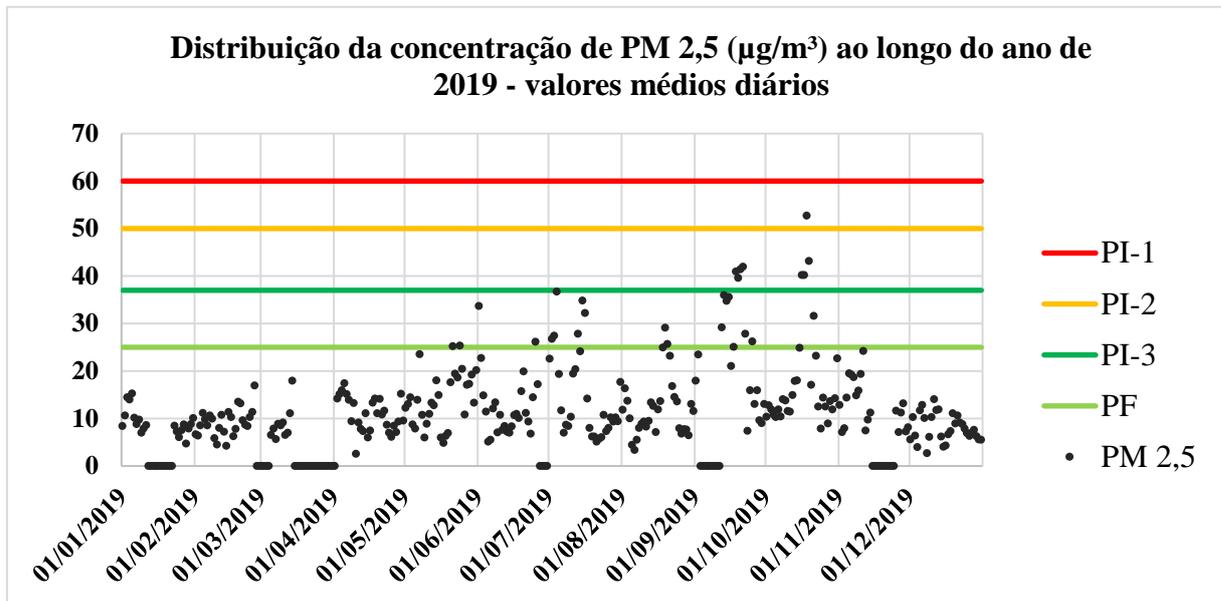
A influência da precipitação e da umidade relativa na concentração do poluente na estação seca também foi relatado no trabalho de Santos e colaboradores (2019), também realizado na cidade de Belo Horizonte, que destacou uma correlação significativa entre esses parâmetros e a concentração de  $MP_{2,5}$ . Dessa forma, torna-se evidente a importância da deposição úmida, por meio dos mecanismos de nucleação e impactação, favorecida no cenário em que estes dois parâmetros meteorológicos estão atuantes. Estes mecanismos são explicados pelos autores da seguinte maneira:

Na nucleação, as partículas em suspensão no ar atuam como núcleos de condensação de gotículas de água, aumentando seu tamanho e densidade, favorecendo sua deposição. No mecanismo de impactação, as gotículas de chuva impactam dinamicamente ou absorvem partículas na atmosfera durante os fenômenos de precipitação, também favorecendo sua deposição úmida e, conseqüentemente, remoção na atmosfera local (SANTOS et al., 2019).

Para poder melhor discutir sobre os padrões fixados para esse poluente, nos Gráficos 7 e 8 (p.60) são apresentadas a distribuição dos valores médios diários calculados para as estações da Avenida Amazonas e da Avenida do Contorno, respectivamente.

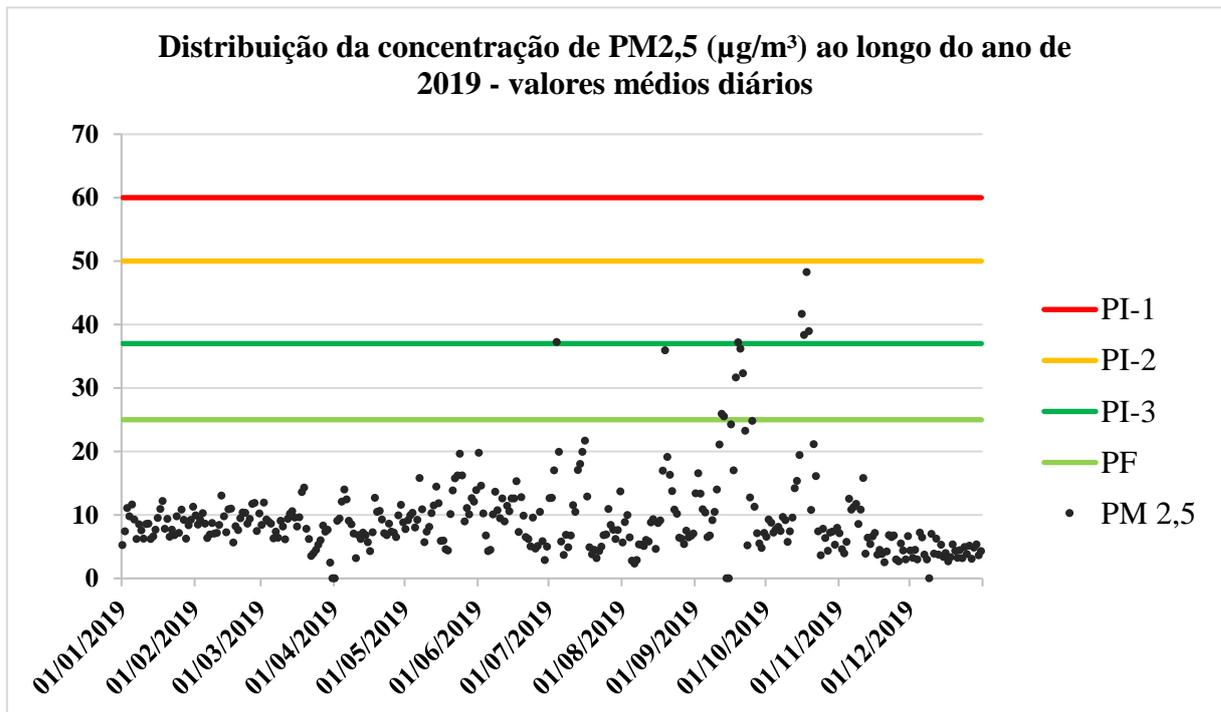
Guerra e Miranda (2011), também observaram maiores concentração de  $MP_{2,5}$  no período de inverno, entre os meses de julho e setembro, ao avaliar dados das regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e de São Paulo, entre 2007 e 2008. Com relação aos valores médios anuais, foram obtidos os valores de 17,0 e 27,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente, os quais foram maiores em relação aos apresentados nesse estudo, para Belo Horizonte (cerca de 11,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Gráfico 7 - Distribuição dos valores médios diários de MP<sub>2,5</sub> na Avenida Amazonas**



Fonte: O autor

**Gráfico 8 - Distribuição dos valores médios diários de MP<sub>2,5</sub> na Avenida do Contorno**



Fonte: O autor.

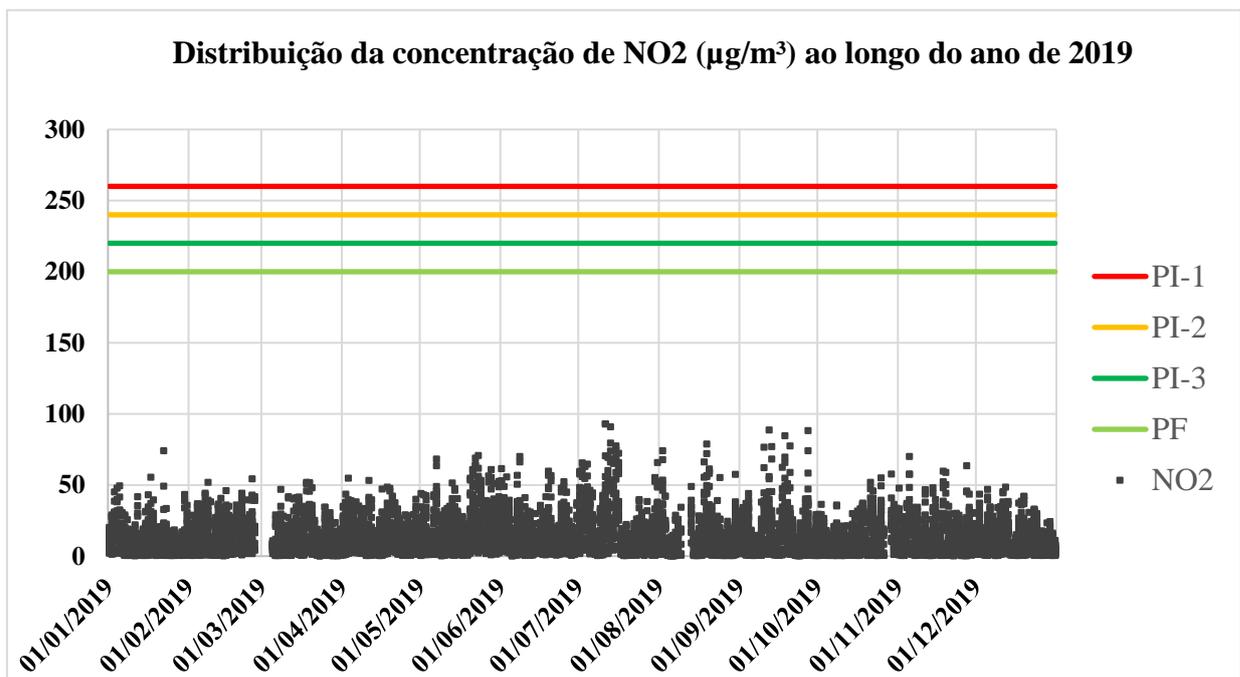
No Gráfico 7 são observadas algumas lacunas nos dados da estação da Avenida Amazonas ao longo do ano. Assim como para o MP<sub>10</sub>, em grande parte do período estudado os valores

estiveram abaixo do Padrão Final (PF) de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Além disso, nenhum dia foi observado concentração média diária acima do Padrão Intermediário 1 (PI-1), atualmente vigente. A mesma avaliação aplica-se para a estação da Avenida do Contorno (Gráfico 8). No entanto, houve mais casos de os valores ultrapassarem o PF na primeira estação (28) em relação à segunda (12).

### 5.2.3 $\text{NO}_2$

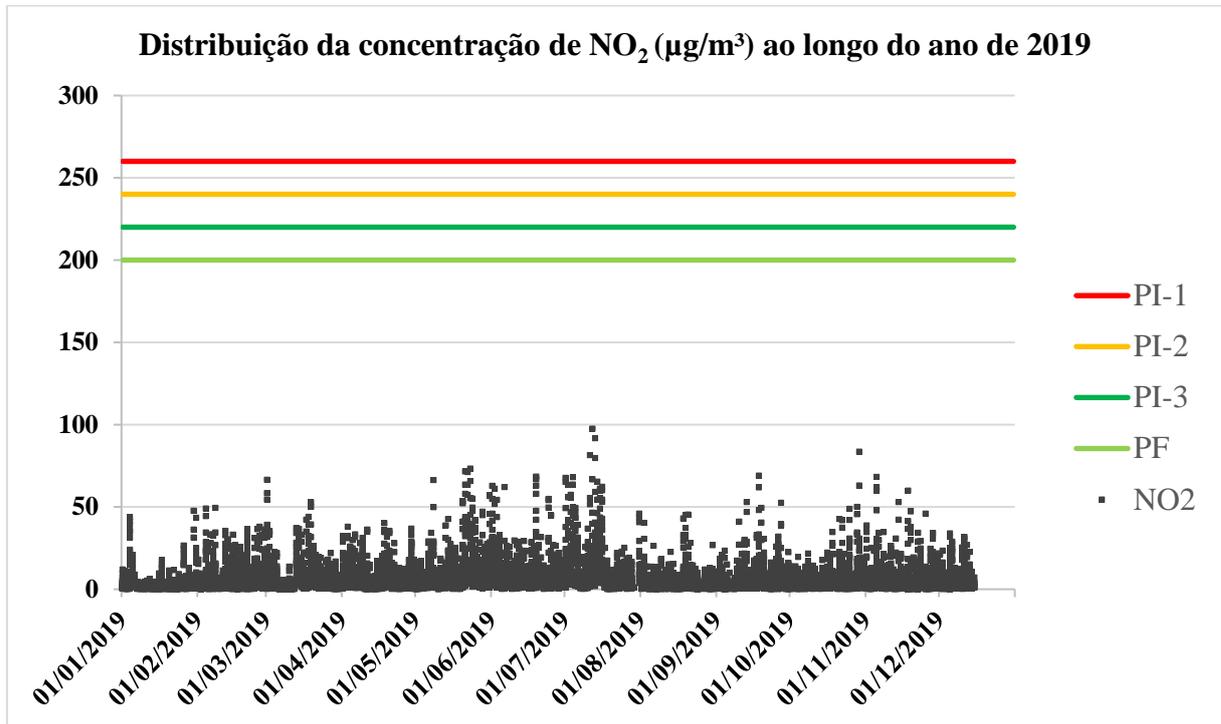
Nos Gráfico 9 e 10 (p. 62) é apresentado a distribuição da concentração de dióxido de nitrogênio ao longo de 2019 nas estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, respectivamente. Tendo em vista que o período de referência para controle desse poluente é a média horária, conforme a Resolução CONAMA nº 491/2018, não foi necessário realizar nenhum tratamento dos dados, como apresentado anteriormente para os dados de material particulado.

**Gráfico 9** - Distribuição dos dados de  $\text{NO}_2$  da estação localizada na Av. Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 10 - Distribuição dos dados de NO<sub>2</sub> da estação localizada na Av. do Contorno**



Fonte: O autor.

Como observado nos gráficos acima, a concentração horária de dióxido de nitrogênio esteve bem abaixo do valor fixado para o Padrão Final (PF) – 200 µg/m<sup>3</sup> durante todo o ano analisado, atingindo, em ambos os casos, valores máximos próximos de 100 µg/m<sup>3</sup>. No entanto, observa-se maiores concentrações entre o final de maio e o início de agosto, ou seja, no período de inverno. Além disso, observa-se uma maior quantidade de pontos na estação localizada na Avenida Amazonas, indicando maior geração de NO<sub>2</sub> nesta avenida em relação à outra. Isso é corroborado analisando-se os valores médios, ainda que na primeira estação tenha havido muitos meses sem dados, ou seja, proporcionalmente, a média da concentração desse poluente na Avenida Amazonas foi de 16,11 µg/m<sup>3</sup>, enquanto na Avenida do Contorno o valor médio anual foi de 9,65 µg/m<sup>3</sup>, isto é, mais que uma vez e meia inferior.

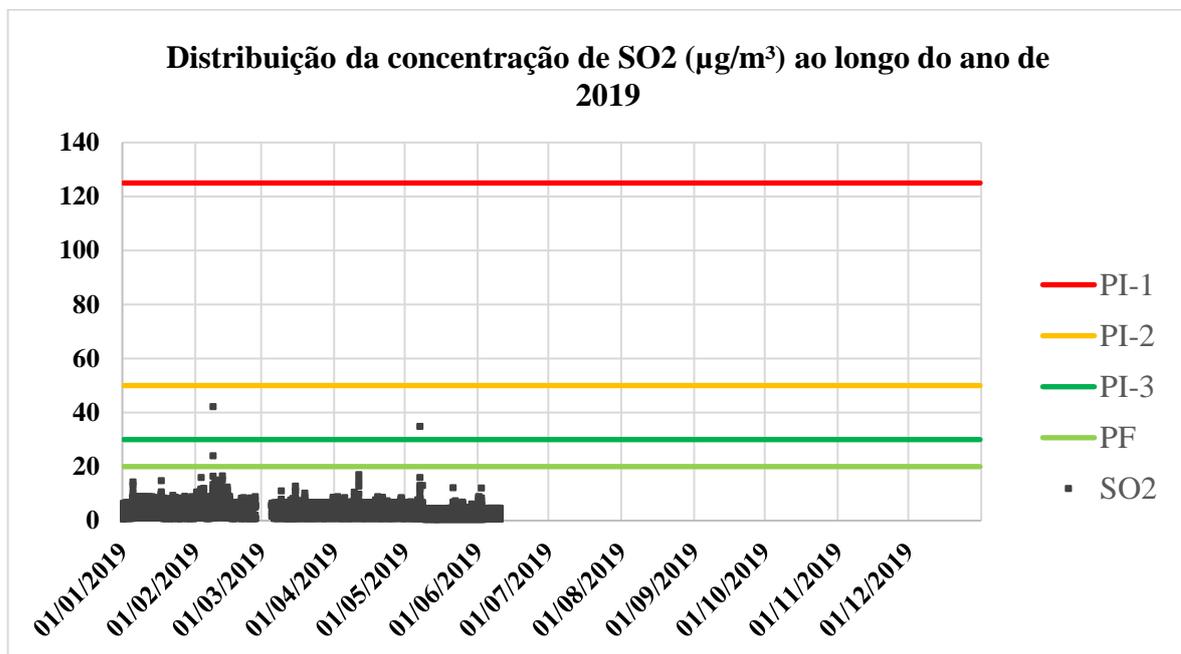
Pinheiro (2003) observou variação sazonal nos dados de NO<sub>2</sub> em estações localizadas em diversas cidades da América do Sul, com valores máximos no inverno e mínimos no verão. Ao analisar esses dados para o período de inverno na cidade de São Paulo nos anos de 2000 e 2001, a autora chegou à conclusão de que os dados apontam para um forte indicativo da ação das fontes locais geradoras desse poluente, bem como os ciclos fotoquímicos que agem na cidade, associados ao ciclo do *smog* fotoquímico. É possível fazer também uma associação com a chuva

ácida, visto que a umidade relativa do ar é maior na época do verão, marcado pelas chuvas na região sudeste.

#### 5.2.4 $SO_2$

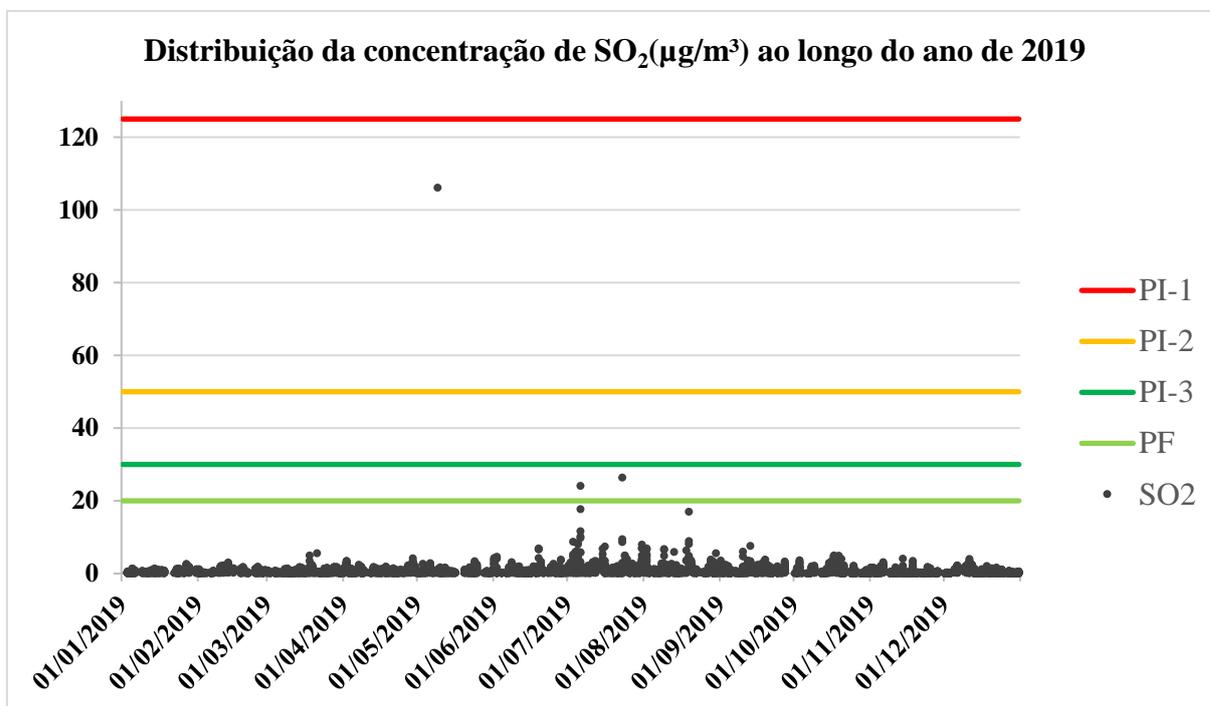
Nos Gráficos 11 e 12 (p.64) é apresentado a distribuição da concentração de dióxido de enxofre ao longo de 2019 nas estações de monitoramento da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, respectivamente.

**Gráfico 11** - Distribuição dos dados de  $SO_2$  da estação localizada na Av. Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 12** - Distribuição dos dados de SO<sub>2</sub> da estação localizada na Av. do Contorno



Fonte: O autor.

Observa-se que a estação localizada na Avenida Amazonas não foi capaz de medir a concentração do poluente no segundo semestre de 2019, provavelmente por algum problema no equipamento de medição. Observa-se que as concentrações medidas do poluente foram muito baixas, mesmo na estação da Avenida do Contorno, a qual foi capaz de fornecer dados ao longo de todo o ano. Nessa estação, observa-se um valor de 106,08 µg/m<sup>3</sup> no dia 09/05/2019 que foge completamente ao padrão apresentado para esse poluente.

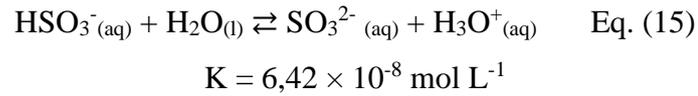
Convém destacar que, geralmente, o poluente é encontrado em baixas concentrações devido à sua alta solubilidade em água e pelo fato de sua oxidação para trióxido de enxofre ser favorecida uma vez que ele é emitido na atmosfera (Equações 13 a 15), o que ocorre tanto na fase gasosa como na fase aquosa, como destacado no trabalho de Silva *et al.* (2017).



$$k_H = 1,23 \text{ mol L}^{-1} \text{ atm}^{-1}$$

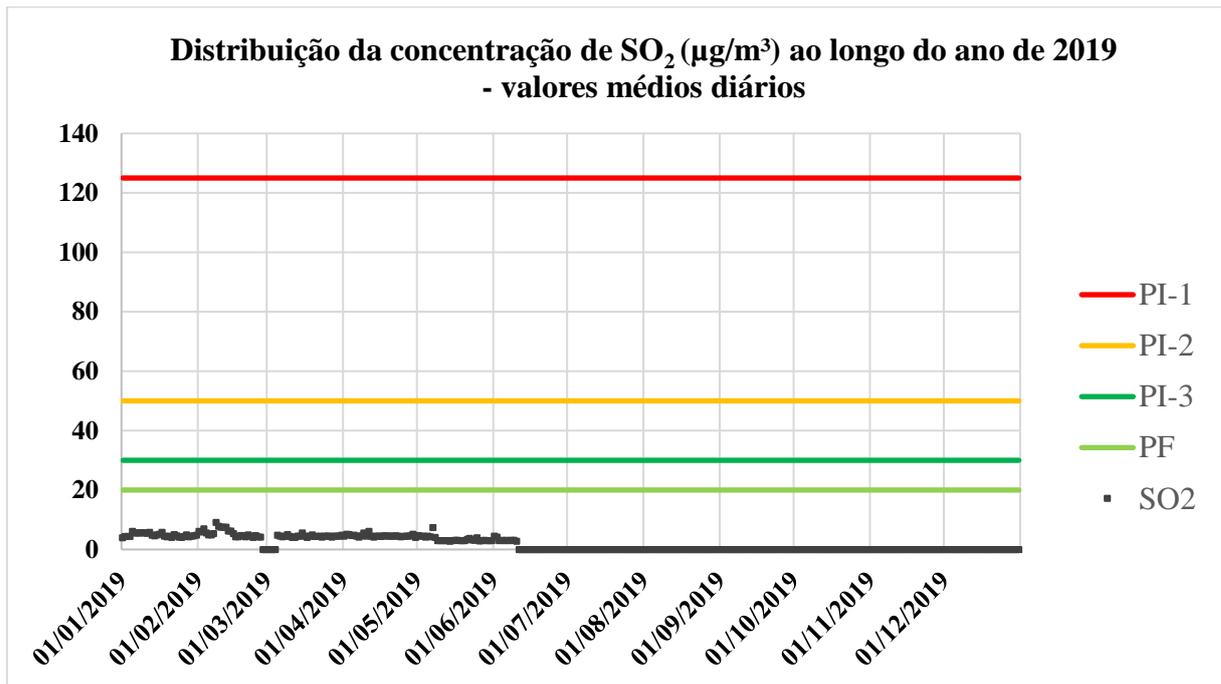


$$K = 1,32 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$$



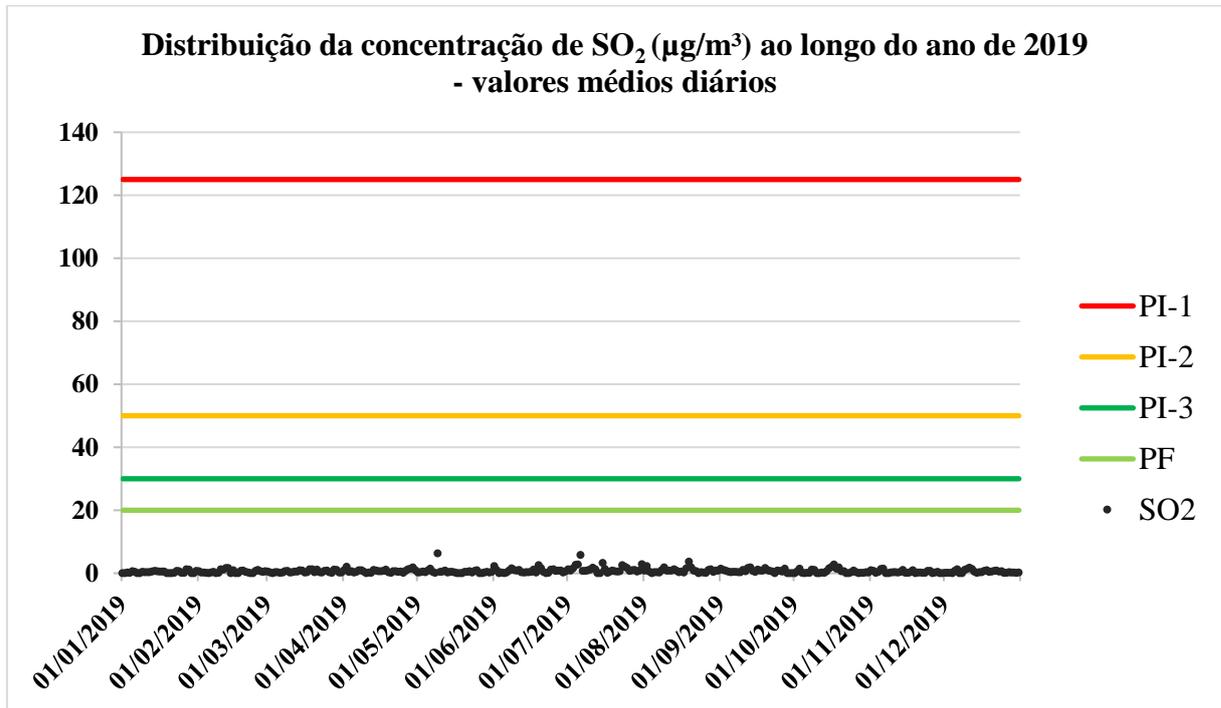
Nos Gráficos 13 e 14 (p.66) são apresentadas a distribuição dos valores médios diários da concentração do dióxido de enxofre para as duas estações em estudo.

**Gráfico 13** - Distribuição dos valores médios diários de SO<sub>2</sub> na Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 14 - Distribuição dos valores médios diários de SO<sub>2</sub> na Avenida do Contorno**



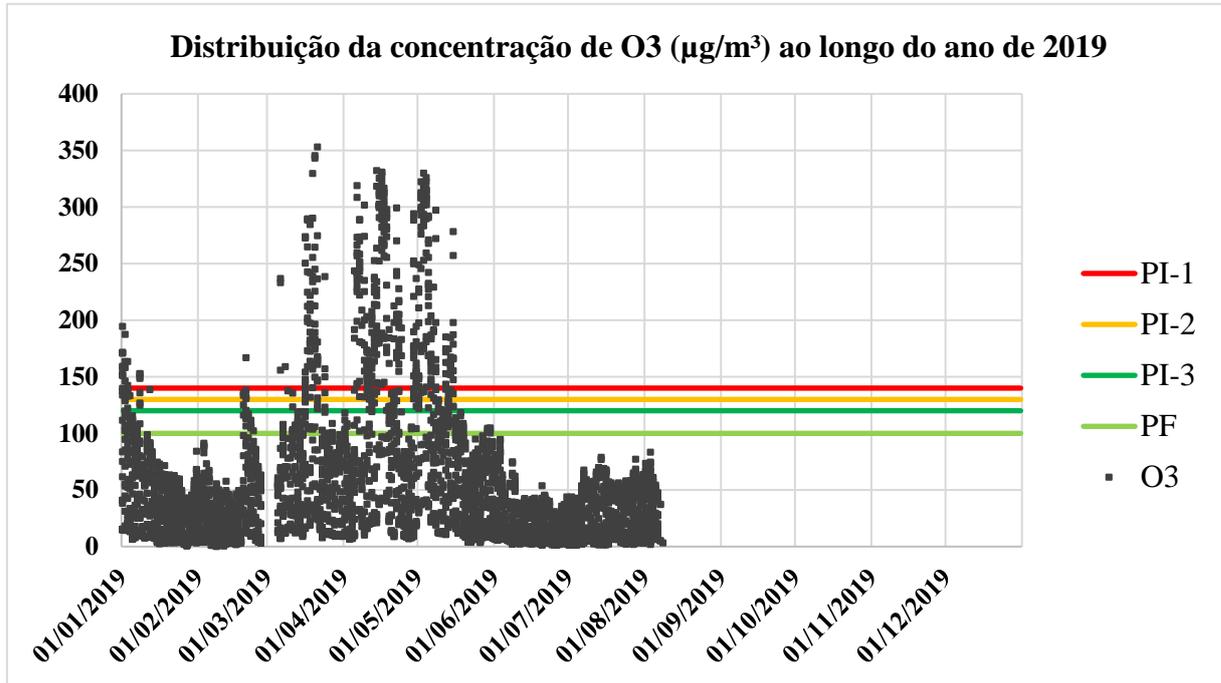
Fonte: O autor.

A mesma avaliação feita para os dados brutos aplica-se aos valores médios, ou seja, nenhum valor medido ultrapassou sequer o Padrão Final de 20 µg/m<sup>3</sup> estabelecido, sendo que muitos deles aproxima-se de zero, pelo motivo já explicitado. No entanto, ao analisar os padrões fixados na resolução CONAMA n° 491/2018, precisamente a proporção entre eles, cabe destacar a grande diferença entre o Padrão Intermediário 1 (125 µg/m<sup>3</sup>) e o seguinte, o Padrão Intermediário 2 (50 µg/m<sup>3</sup>), o que vai ao encontro da ideia de grande permissividade dos padrões intermediários fixados na legislação brasileira, conforme já abordado na revisão bibliográfica deste trabalho.

#### 5.2.5 O<sub>3</sub>

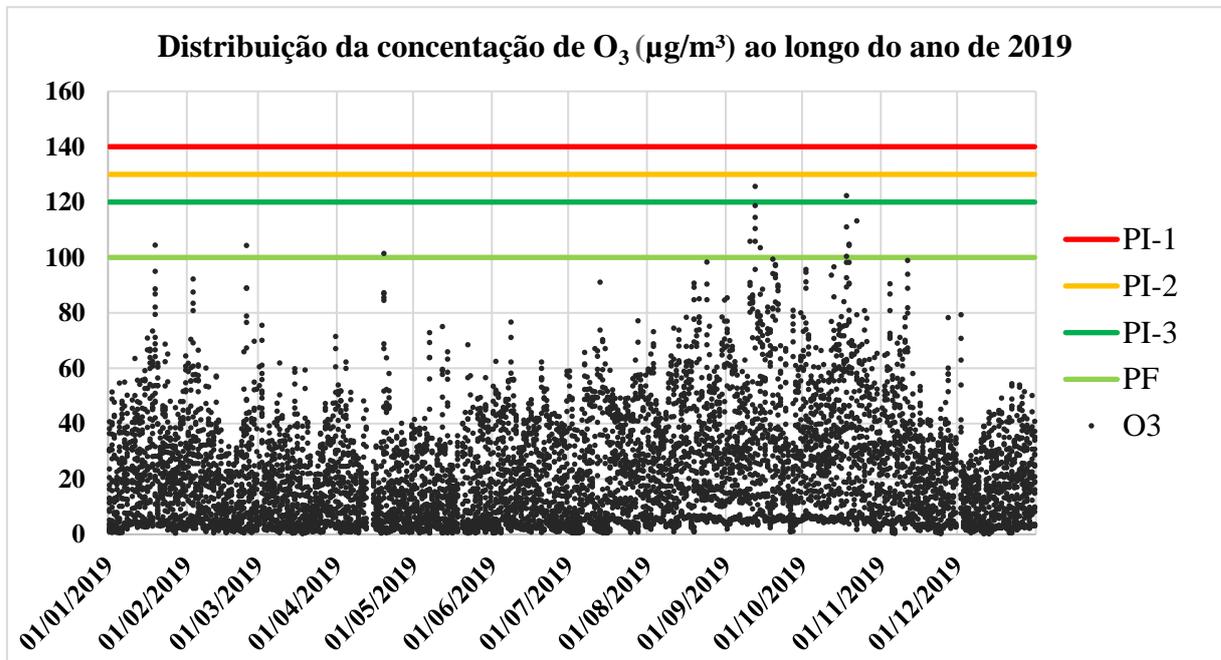
Na sequência, apresentam-se os gráficos de distribuição da concentração de ozônio nas estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, nos Gráficos 15 e 16, respectivamente.

**Gráfico 15** - Distribuição dos dados de O<sub>3</sub> da estação localizada na Av. Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 16** - Distribuição dos dados de O<sub>3</sub> da estação localizada na Av. do Contorno



Fonte: O autor.

Como observado no Gráfico 15, certamente por algum problema no aparelho medidor, os dados de ozônio na estação da Avenida Amazonas não foram medidos a partir de agosto de 2019, omitindo possíveis ultrapassagens nas concentrações em outros períodos do ano, sobretudo

durante os meses mais secos, como ocorreu para a estação da Avenida do Contorno. Percebe-se uma grande diferença de escala entre os dados das duas estações de monitoramento. Ao contrário da estação da Avenida do Contorno, a estação da Avenida Amazonas apresentou grandes picos na concentração de ozônio no mês de janeiro, depois entre março e junho, atingindo um valor máximo de 352,98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  no dia 21 de março.

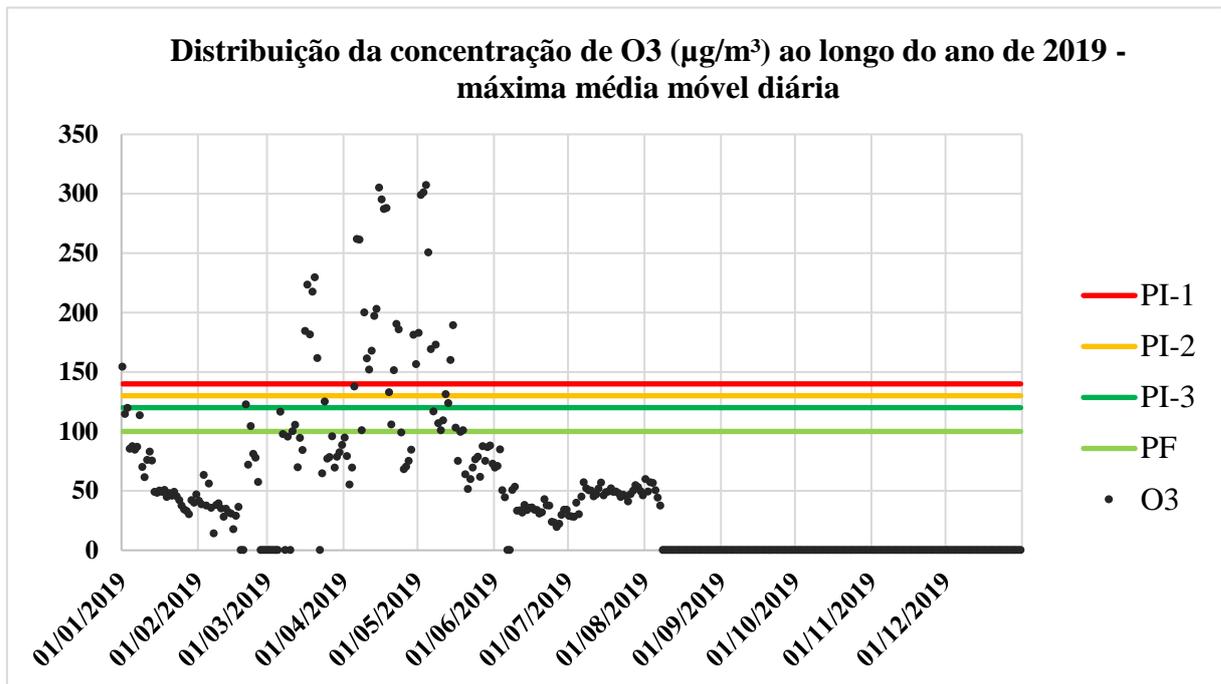
Os picos atingidos na estação da Avenida do Contorno foram distribuídos ao longo do ano, mas cabe destacar os meses de setembro e outubro, quando houve concentrações de 125,72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (12/09/2019) e 122,45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (18/10/2019).

É possível explicar essa diferença analisando o precursor imediato do ozônio, ou seja, o dióxido de nitrogênio. Como dito anteriormente, a média anual de  $\text{NO}_2$  foi mais de 1,5 maior na estação localizada na Avenida Amazonas em relação àquela localizada na Avenida do Contorno, o que pode estar relacionado à hipótese de maior circulação de veículos pesados na primeira, que é a principal via de acesso a cidades vizinhas, como Contagem e Betim, consideradas polos industriais na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Silva (2019) constatou um padrão no ciclo anual do ozônio, analisando todas as estações de monitoramento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro em que houve ultrapassagens ao padrão vigente na época para o ozônio, no período de 2012 a 2016. O autor observou que os meses em que há maior número de ultrapassagens ao padrão são os mais quentes, sobretudo no início do ano, entre janeiro e abril. A mesma avaliação aplica-se aos valores médios mensais obtidos: as maiores médias mensais de ozônio (janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro) coincidem com os meses mais quentes. Assim como o observado para a estação da Avenida do Contorno, o autor observou algumas estações no Rio de Janeiro que apresentaram maiores médias mensais nos meses de setembro e outubro, apesar de serem menos quentes que os demais meses da primavera e verão.

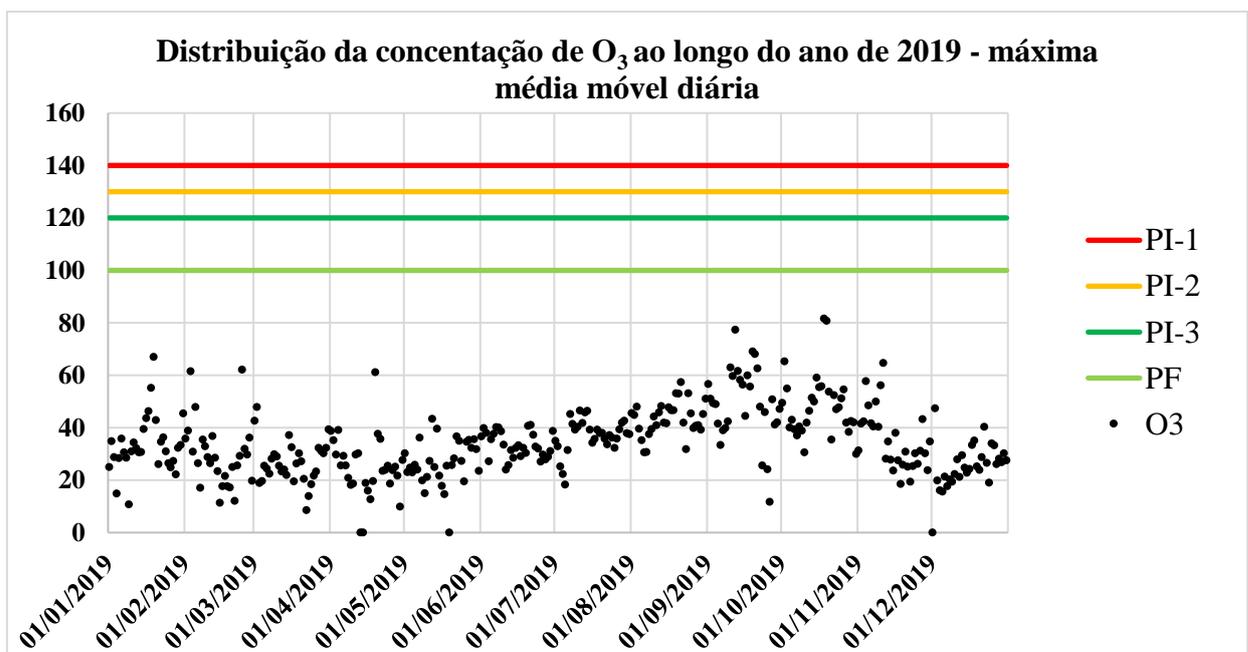
Nos Gráficos 17 e 18 (p.69) são apresentados os valores da máxima média móvel obtida no dia para as concentrações de ozônio, conforme período de referência da resolução CONAMA nº 491/2018.

**Gráfico 17 - Distribuição dos valores de máxima média móvel diária de O<sub>3</sub> na Avenida Amazonas**



Fonte: O autor.

**Gráfico 18 - Distribuição dos valores de máxima média móvel diária de O<sub>3</sub> na Avenida do Contorno**



Fonte: O autor.

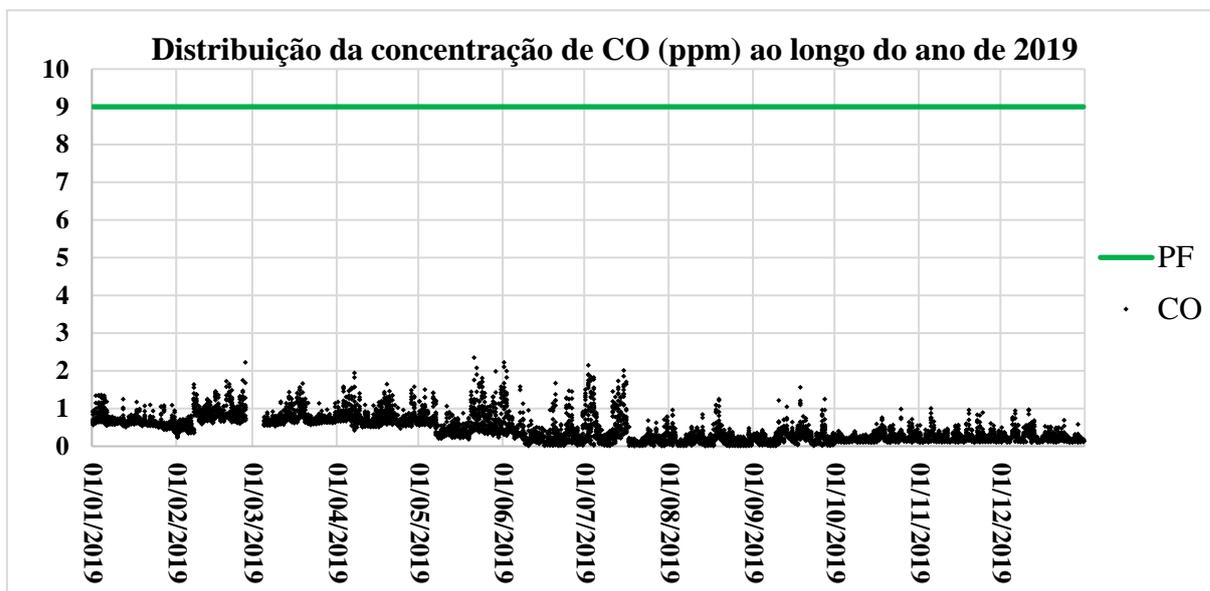
Como é possível observar no Gráfico 17, houve vários dias (33 ao todo) em que a concentração de ozônio ultrapassou o Padrão Intermediário 1 ( $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) na estação da Avenida Amazonas, entre os meses de março e maio de 2019. Os maiores valores obtidos nesse período foram de  $316,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , em 17/04/2019 e  $322,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , em 02/05/2019. Com relação ao Padrão Final para esse poluente, cujo limite é  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor este preconizado pela OMS, foi ultrapassado em 53 dias, o que corresponde a cerca de 26% dos dias em que a estação registrou algum dado.

Com relação à estação da Avenida do Contorno, durante todo o ano os valores relativos à concentração de ozônio estiveram abaixo do Padrão Final e, conseqüentemente, dos demais, apesar de ter havido valores pontuais em algumas horas do dia em que a concentração ultrapassou esse limite, como constatado no Gráfico 18.

#### 5.2.6 CO

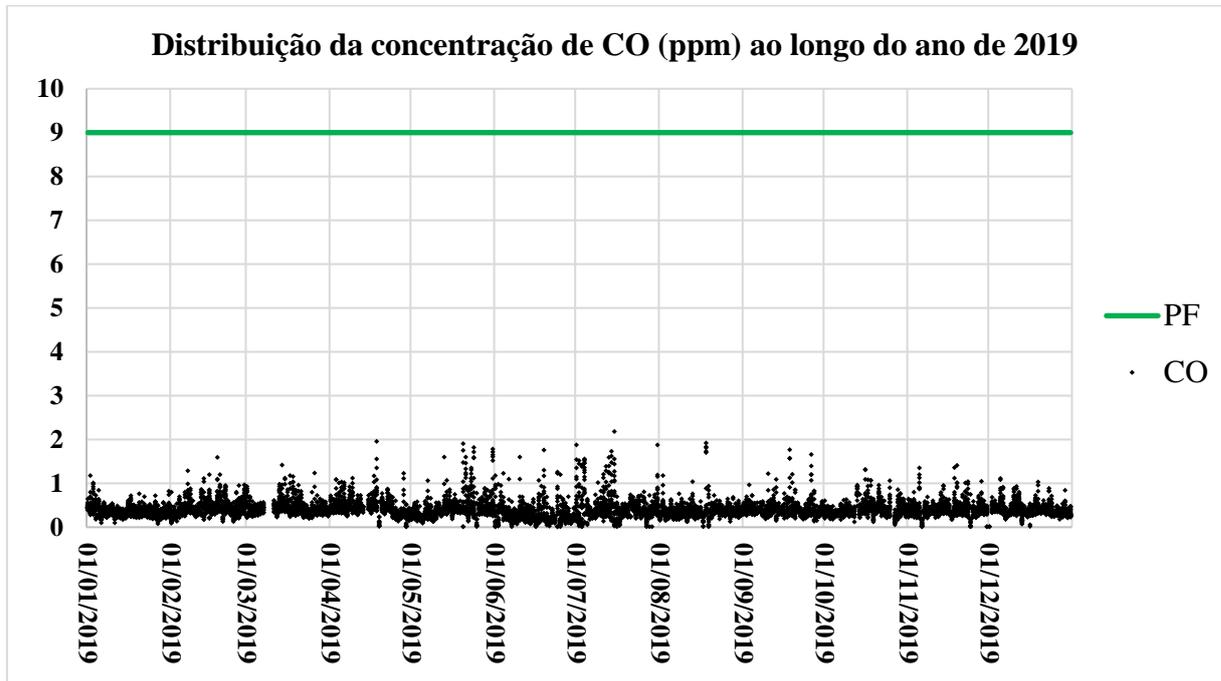
Nos Gráficos 19 e 20 (p.71) é apresentada a distribuição da concentração de monóxido de carbono ao longo do ano de 2019 nas estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, respectivamente.

**Gráfico 19 - Distribuição da concentração de CO na Avenida Amazonas**



Fonte: O autor.

**Gráfico 20 - Distribuição da concentração de CO na Avenida do Contorno**

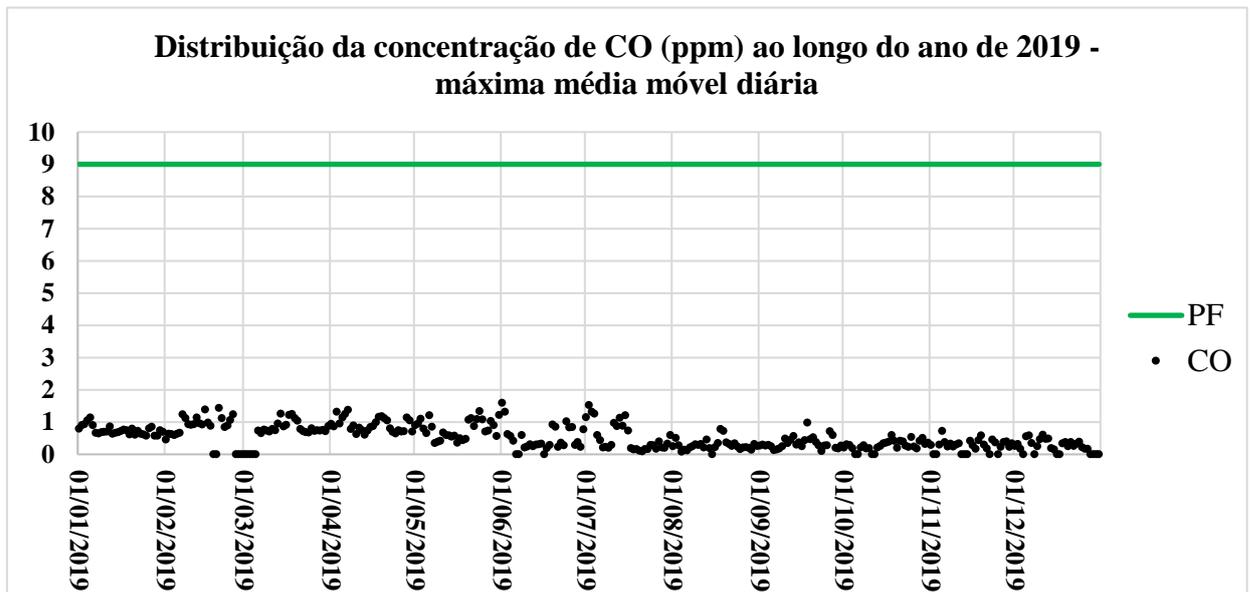


Fonte: O autor.

As concentrações do poluente ao longo do ano em ambas as estações foram bem baixas, como é possível observar nos gráficos correspondentes. Apesar disso, em alguns períodos do ano foram um pouco mais altas que o restante, por exemplo, nos meses de junho e julho, marcados pela estação seca (outono e inverno). Cabe destacar que a literatura chama atenção para as emissões de monóxido de carbono no outono, associando à degradação da clorofila, bem como de outras moléculas orgânicas oxigenadas, por exemplo nas queimadas (MANAHAN, 2013).

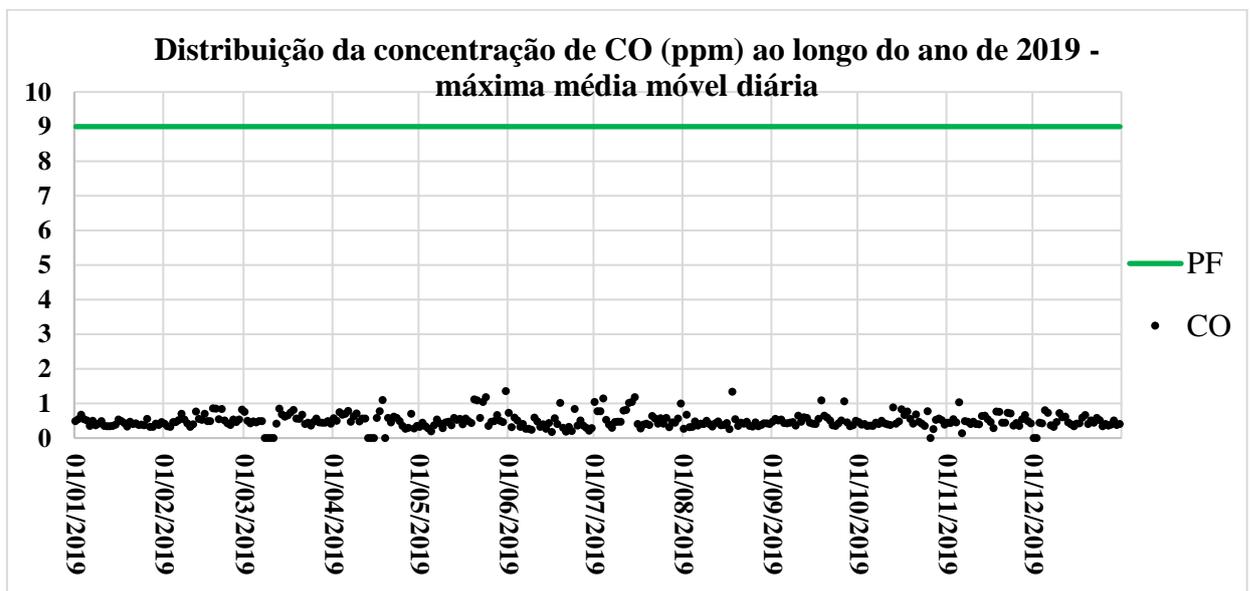
Nos Gráficos 21 e 22 (p.72) são apresentados os valores da concentração após o cálculo da máxima média móvel obtida no dia, conforme período de referência da norma aplicável. A mesma avaliação é possível para os valores apresentados nos gráficos seguintes, nas quais é corroborado que as concentrações estiveram bem abaixo do padrão fixado na resolução CONAMA n° 491/2018.

**Gráfico 21** - Distribuição da máxima média móvel diária da concentração de CO na Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 22** - Distribuição da máxima média móvel diária da concentração de CO na Avenida do Contorno



Fonte: O autor.

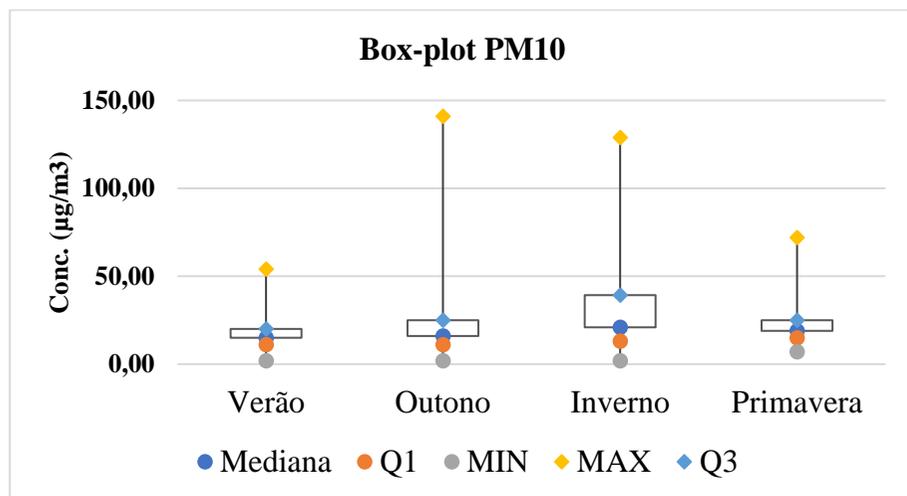
### 5.3 Variação sazonal

Com intuito de incrementar a avaliação das variações sazonais dos dados, apresentam-se os gráficos do tipo *Boxplots* para cada um dos poluentes estudados, para os quais foram

selecionados meses representativos de cada estação – verão, outono, inverno e primavera, conforme já destacado.

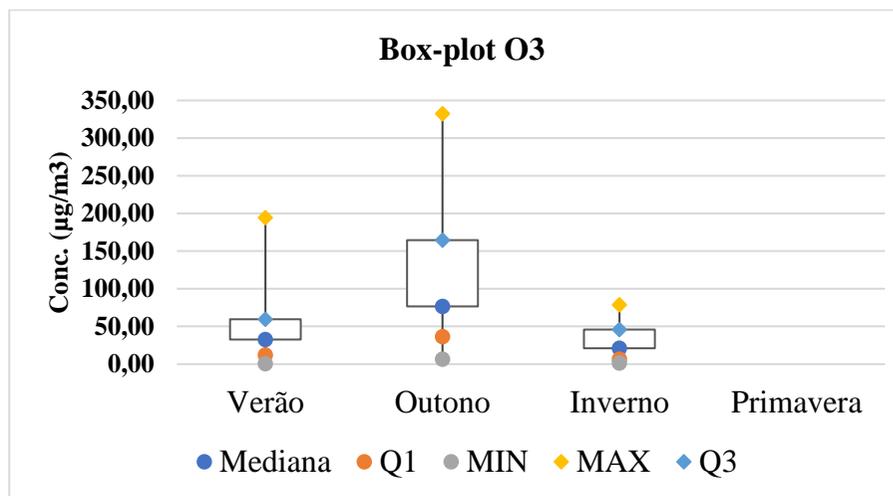
Nas Figuras de 17 a 22 (p. 74 e 75) são trazidos os gráficos do tipo *Boxplots* para cada um dos poluentes de estudo referentes à estação localizada na Avenida Amazonas. Já as figuras 23 a 28 (p. 76 e 77) são os mesmos gráficos, porém referentes à estação da Avenida do Contorno.

**Figura 17** – Boxplots de MP<sub>10</sub> na Estação da Avenida Amazonas



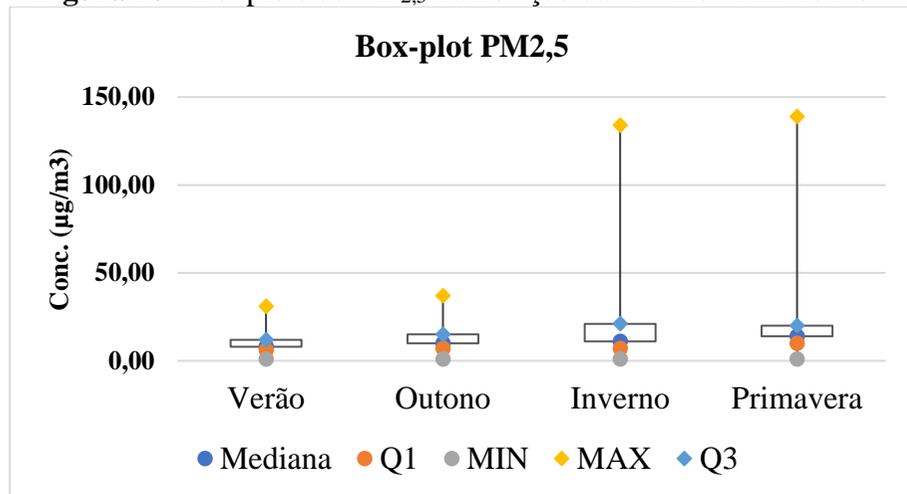
Fonte: O autor.

**Figura 19** - Boxplots de O<sub>3</sub> na Estação da Avenida Amazonas



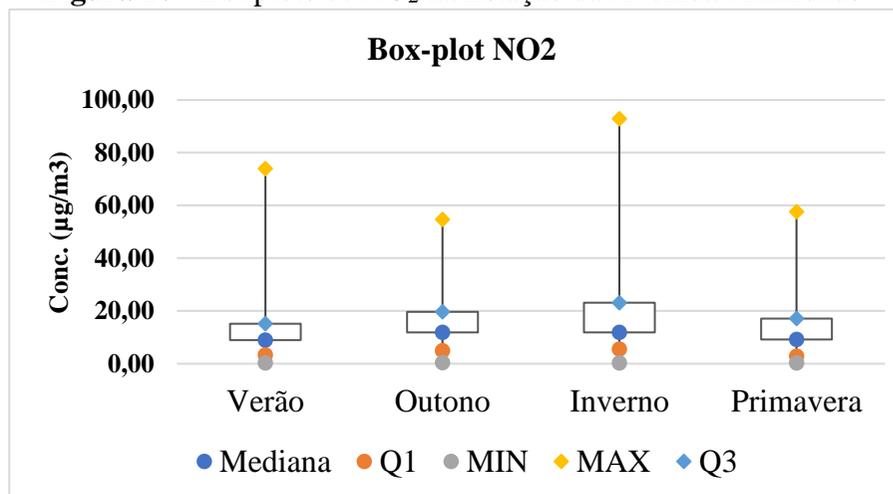
Fonte: O autor.

**Figura 18** - Boxplots de MP<sub>2,5</sub> na Estação da Avenida Amazonas

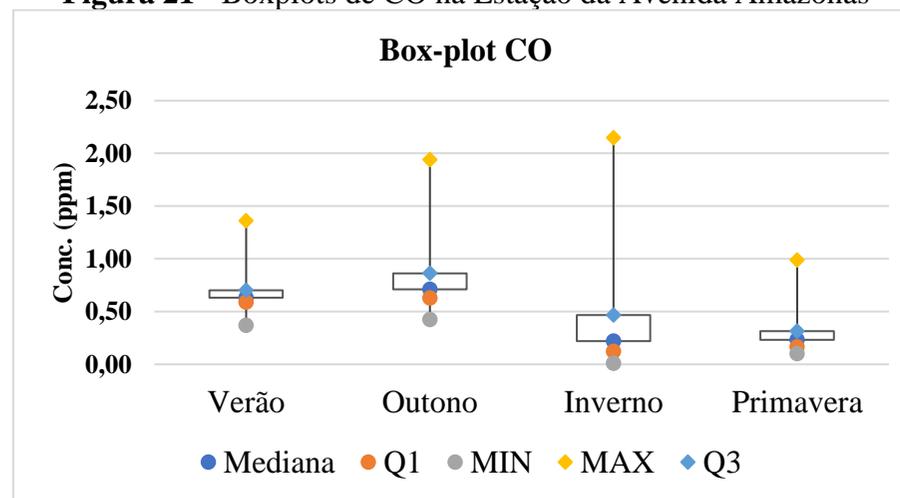


Fonte: O autor.

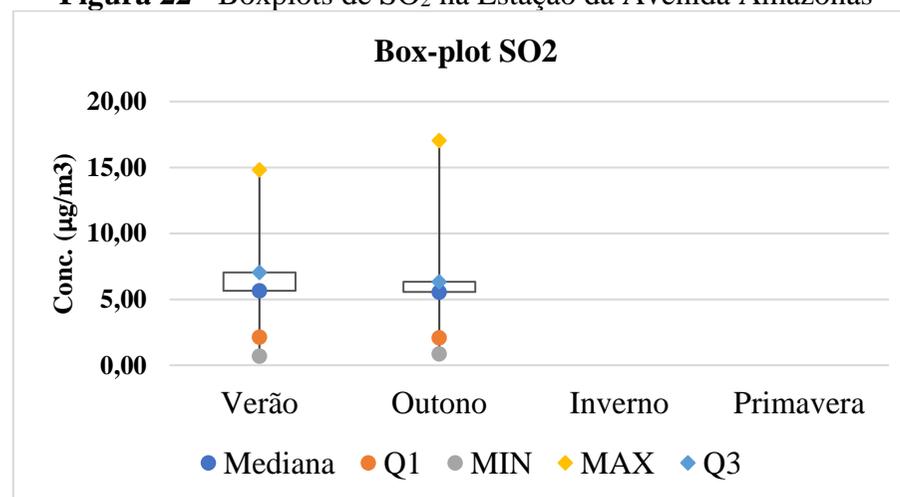
**Figura 20** - Boxplots de NO<sub>2</sub> na Estação da Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

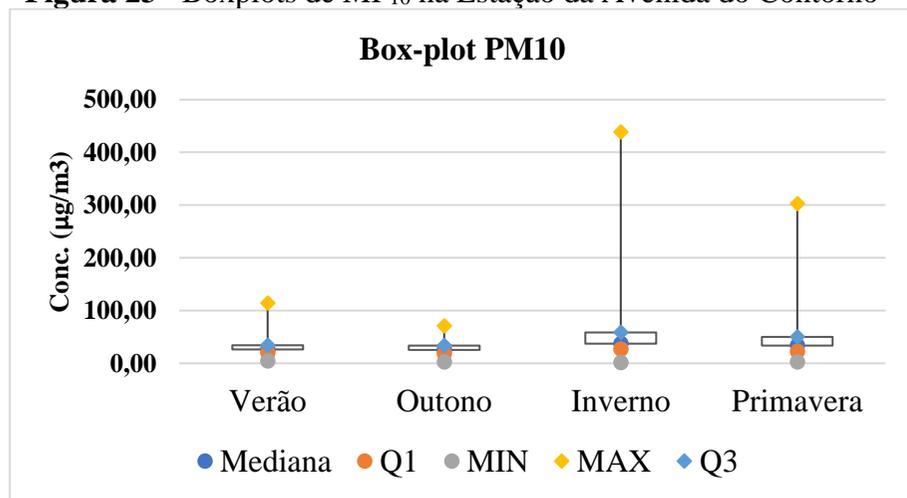
**Figura 21 - Boxplots de CO na Estação da Avenida Amazonas**

Fonte: O autor.

**Figura 22 - Boxplots de SO<sub>2</sub> na Estação da Avenida Amazonas**

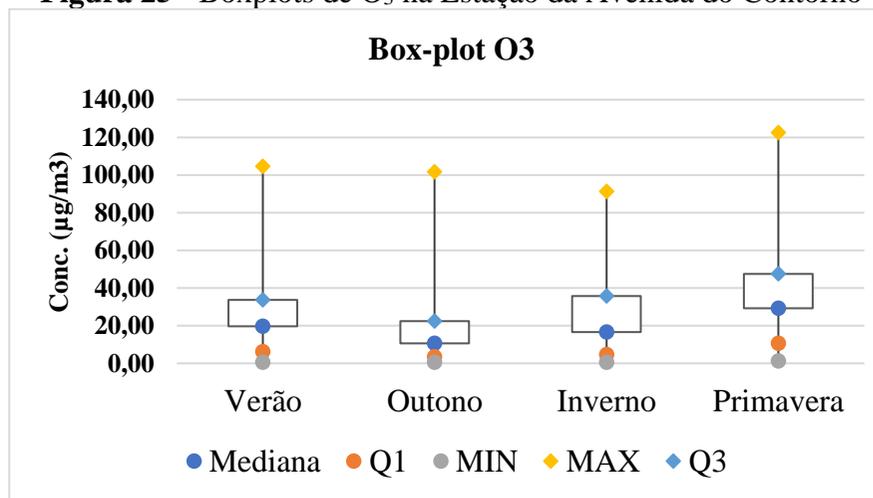
Fonte: O autor.

**Figura 23 -** Boxplots de MP<sub>10</sub> na Estação da Avenida do Contorno



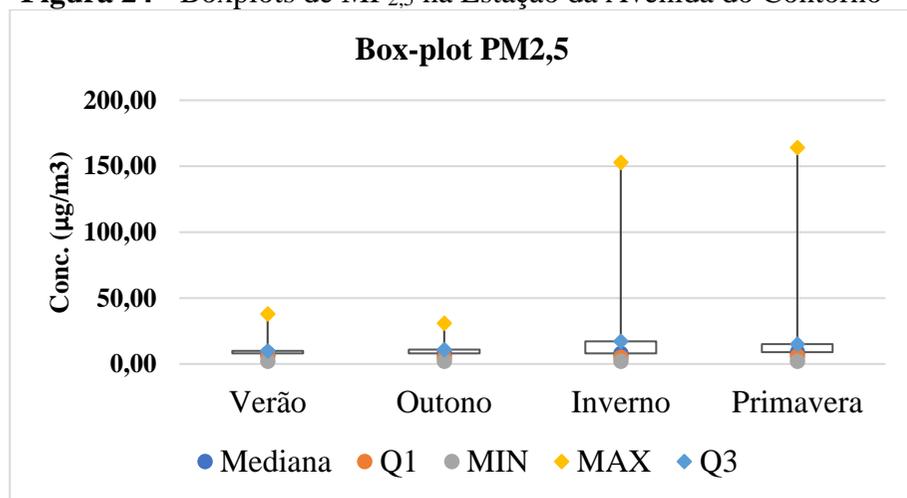
Fonte: O autor.

**Figura 25 -** Boxplots de O<sub>3</sub> na Estação da Avenida do Contorno



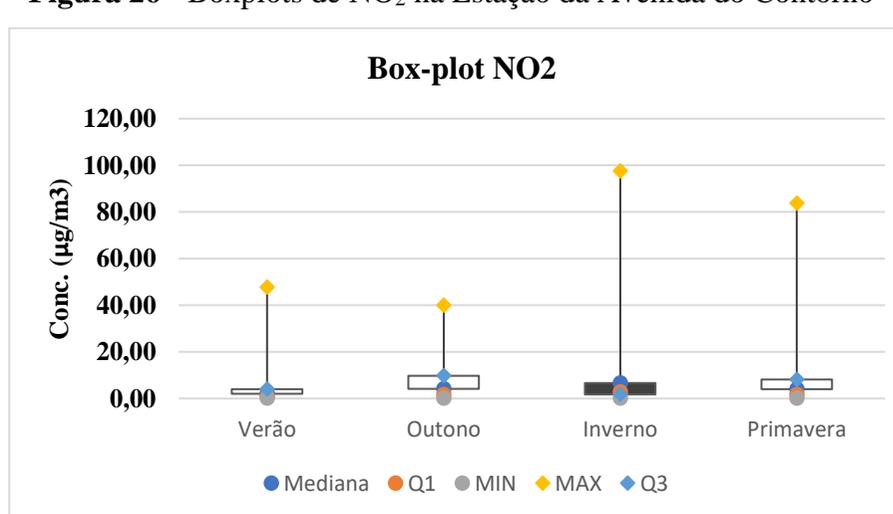
Fonte: O autor.

**Figura 24 -** Boxplots de MP<sub>2,5</sub> na Estação da Avenida do Contorno

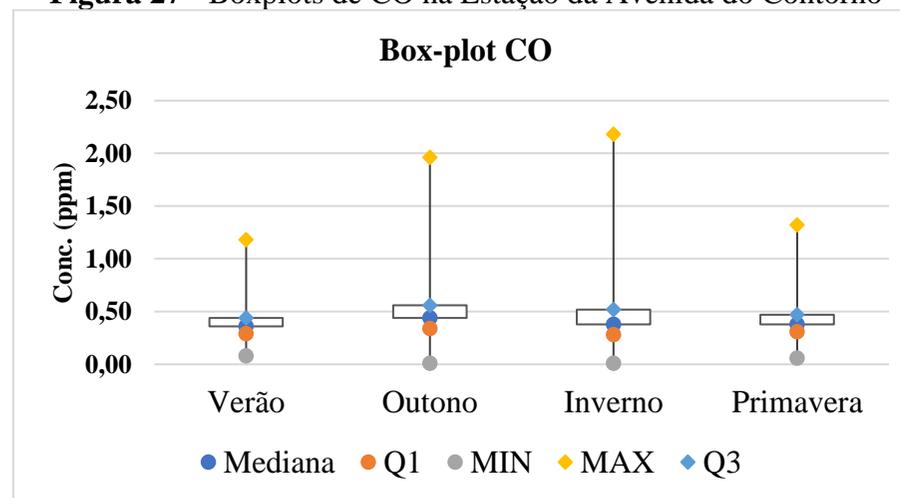


Fonte: O autor

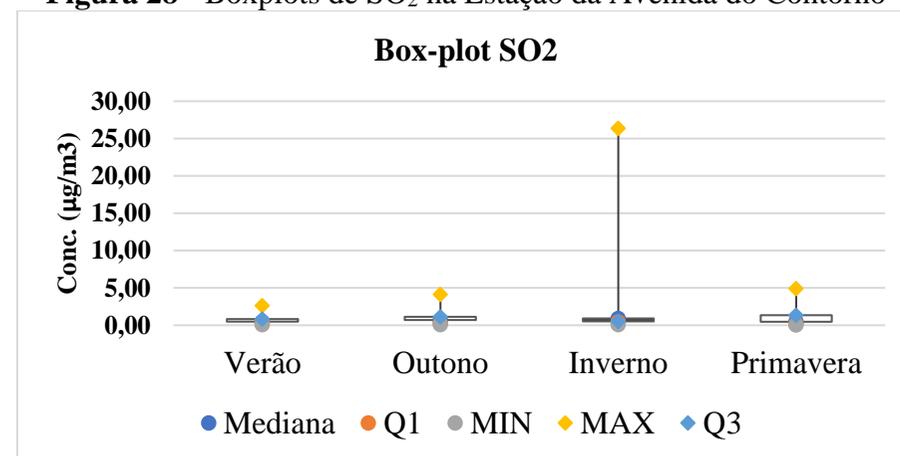
**Figura 26 -** Boxplots de NO<sub>2</sub> na Estação da Avenida do Contorno



Fonte: O autor

**Figura 27 - Boxplots de CO na Estação da Avenida do Contorno**

Fonte: O autor.

**Figura 28 - Boxplots de SO<sub>2</sub> na Estação da Avenida do Contorno**

Fonte: O autor.

Com relação ao material particulado inalável ( $MP_{10}$ ), as medianas obtidas no verão foram de  $15,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $26,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); no outono foram de  $16,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $25,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); no inverno foram de  $21,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $37,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); e, por fim, na primavera as medianas foram de  $19,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $33,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno). Observa-se que os valores foram todos superiores na estação localizada na Avenida do Contorno. No entanto, na estação da Avenida Amazonas, foi possível constatar que os maiores valores máximos foram atingidos nas estações do outono e inverno, enquanto na estação da Avenida do Contorno, isso aconteceu nas estações do inverno e primavera, corroborando análise realizada nos gráficos de dispersão ao redor da mediana. Além disso, nota-se que houve maior variabilidade dos dados na estação do inverno, o que é perceptível dado o maior tamanho da caixa.

Já com relação ao material particulado respirável ( $MP_{2,5}$ ), as medianas obtidas no verão foram de  $8,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tanto na Av. Amazonas como na Av. do Contorno); no outono foram de  $10,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $8,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); no inverno foram de  $11,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $8,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); e, por fim, na primavera as medianas foram de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $9,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno). Os maiores valores máximos foram observados, portanto, nas estações inverno e primavera em ambas as estações.

Com relação ao ozônio ( $O_3$ ), as medianas do verão foram  $32,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $19,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); no outono foram  $76,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $10,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); já no inverno foram  $21,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $16,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); na primavera somente há dados para a estação da Avenida do Contorno, cuja mediana obtida foi de  $29,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Observa-se que os valores foram muito superiores na estação localizada na Avenida Amazonas, com valores máximos extremamente altos no verão ( $194,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e no outono ( $332,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Na estação da Avenida do Contorno, os valores máximos estiveram mais distribuídos ao longo das estações, com máximo absoluto ocorrendo na primavera ( $122,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Com relação ao dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), as medianas do verão foram de  $8,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $2,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); no outono foram  $11,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $4,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); já no inverno foram  $11,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e  $6,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); por fim, na primavera foram de  $9,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e de  $4,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(Av. do Contorno). Observa-se que os valores obtidos foram bem superiores na estação localizada na Avenida Amazonas, coincidindo com a avaliação feita para o ozônio, ou seja, corrobora o fato de o dióxido de nitrogênio atuar como precursor na formação desse poluente, como já discutido anteriormente. Com relação aos valores máximos absolutos ocorrido nas estações, foram em ambas as estações de monitoramento no inverno, correspondendo a 92,84  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na Avenida Amazonas e 97,59  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , valores próximos.

O monóxido de carbono (CO) apresentou valores baixos em ambas as estações, com pouca variabilidade entre os dados nas 4 estações do ano. No verão, as medianas foram de 0,63 ppm (Av. Amazonas) e 0,36 ppm (Av. do Contorno); no outono foram de 0,71 ppm (Av. Amazonas) e 0,44 ppm (Av. do Contorno); já no inverno os valores foram de 0,22 ppm (Av. Amazonas) e 0,38 ppm (Av. do Contorno); por fim, na primavera, as medianas foram de 0,23 ppm (Av. Amazonas) e 0,38 ppm (Av. do Contorno). Os valores máximos foram bem próximos nas duas estações de monitoramento, sendo que o maior valor de máximo ocorreu no inverno em ambas as estações (2,15 e 2,18 ppm).

Por fim, avaliando os gráficos *boxplots* relativos ao dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), na estação da Avenida Amazonas não houve dados disponíveis nas estações do inverno e da primavera, enquanto na estação da Avenida do Contorno, apesar de haver dados para todas as estações do ano, muitos dados estiveram ausentes em todas elas, prejudicando a análise. No verão, os valores de medianas apresentados foram de 5,64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e 0,48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); no outono foram de 5,56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. Amazonas) e 0,71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Av. do Contorno); já no inverno e primavera, a mediana na Av. do Contorno foi de 0,93  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e 0,47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

Dessa forma, com relação à variação sazonal dos dados, foi possível observar as diferenças nas concentrações e seus valores máximos sobretudo nas estações secas, o que era esperado.

#### **5.4 Variação Horária**

Com o intuito de avaliar e poder discutir a variação horária dos dados ao longo do dia, foi selecionado um dia do ano (5 de janeiro de 2019) para ambas as estações, por ser um dia em que os dados estiveram completos (até às 22h30min). Foram selecionados todos os poluentes de estudo, além dos parâmetros meteorológicos temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, radiação solar e umidade relativa. Nas Tabelas 10 (p. 81) e 11 (p. 82) são apresentados

os dados selecionados, para as estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, respectivamente. Os dados foram agrupados conforme o interesse de análise e apresentados em gráficos de dispersão.

**Tabela 10** – Dados horários de concentração de poluentes e de parâmetros meteorológicos do dia 05/01/2019 na estação da Avenida Amazonas

Hora	PM 10	PM 2,5	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	Temperatura	Precipitação	Vel. Ventos	Rad. Solar	Umidade Rel.
	(µg/m <sup>3</sup> )						ppm	°C	mm	m/s	W/m <sup>2</sup>
0:30	35	26	5,56	6,88	0,93	1,17	21,3	0	0,83	0	77
1:30	27	14	4,89	6,68	0,98	1,14	20,6	0	0,36	0	81
2:30	30	22	4,74	8,57	1,06	1,24	20,5	0	0,43	0	84
3:30	36	17	4,34	8,43	1,09	1,24	20,5	0	0,59	0	85
4:30	29	12	4,34	6,27	1,09	1,03	20,0	0	0,51	0	83
5:30	27	15	9,18	16,72	2,67	0,93	19,6	0	0,65	0	86
6:30	30	21	13,79	30,53	5,34	1,03	19,1	0	0,3	16,89	89
7:30	37	18	28,75	60,6	9,05	1,29	20,1	0	0,24	80,75	87
8:30	38	22	41,48	62,92	8,56	1,34	22,3	0	0,41	182,46	75
9:30	26	20	49,3	62,07	7,88	1,19	24,2	0	0,53	316,96	67
10:30	30	10	32,34	63,33	7,38	0,90	27,3	0	1,04	636,96	53
11:30	27	17	32,22	104,43	8,24	0,86	27,8	0	1,7	576,74	52
12:30	27	16	28,09	115,41	13,06	0,80	28,0	0	2,05	644,47	52
13:30	23	16	22,51	112,38	14,42	0,74	28,5	0	2,02	728,61	50
14:30	10	7	19,27	94,93	10,63	0,66	30,0	0	2,06	779,46	44
15:30	9	4	12,83	84,7	8,4	0,62	29,6	0	2,74	635,51	45
16:30		2	11,79	83,75	7,83	0,63	29,9	0	2,32	503,09	45
17:30	15	7	13,1	110,62	8,57	0,61	29,5	0	2,07	360,85	46
18:30	12	10	14,82	110,41	8,41	0,63	27,8	0	0,98	135,35	50
19:30	16	10	21,49	75,48	7,09	0,74	26,2	0	0,62	17,78	55
20:30	17	16	19,48	46,33	5,13	0,91	24,9	0	0,27	0,04	61
21:30	34	26	22,94	26,56	3,99	1,27	24,1	0	0,25	0,01	66
22:30	40	26	12,79	14,45	2,32	1,30	23,3	0	0,26	0	70

Fonte: O autor.

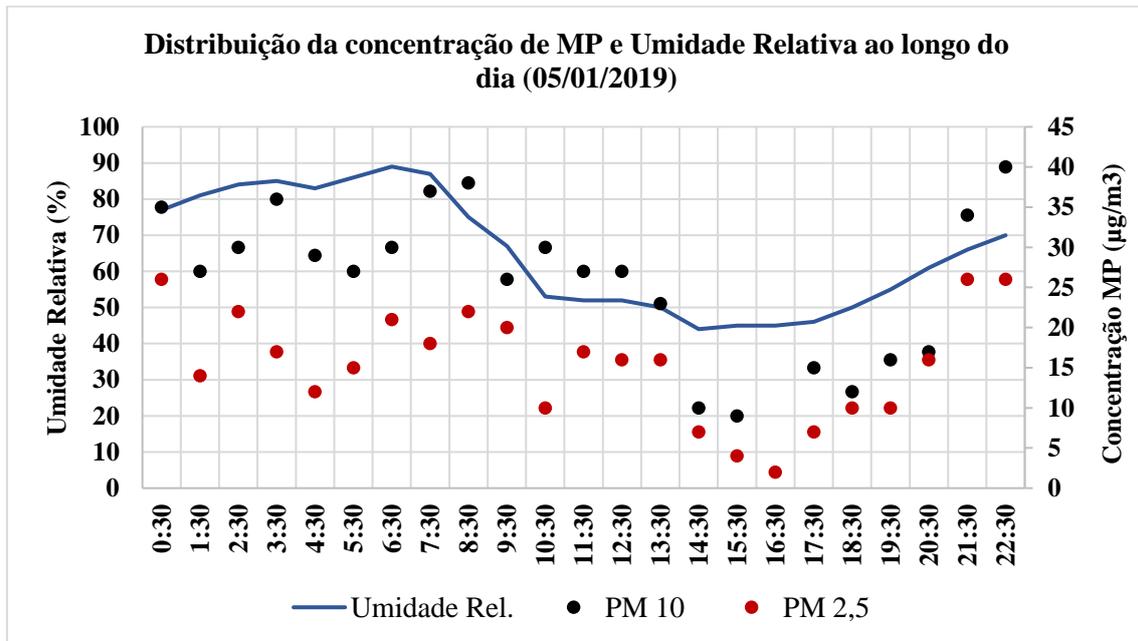
**Tabela 11** – Dados horários de concentração de poluentes e de parâmetros meteorológicos do dia 05/01/2019 na estação da Avenida do Contorno

Hora	PM 10	PM 2,5	NO2	O3	SO2	CO	Temperatura	Precipitação	Vel. Ventos	Rad. Solar	Umidade Rel.
	(µg/m <sup>3</sup> )						ppm	°C	mm	m/s	W/m <sup>2</sup>
0:30	41,9	9,0	3,92	0,84	0,12	0,39	23,1	0	0,66	2,55	80
1:30	38,0	13,0	4,08	0,86	0,11	0,46	22,7	0	0,67	3,1	82
2:30	35,1	19,0	4,11	0,96	0,16	0,59	22,6	0	0,75	3,36	84
3:30	39,8	14,0	3,6	0,63	0,18	0,55	22,6	0	0,93	2,09	83
4:30	42,1	9,0	2,43	0,79	0,16	0,37	21,4	0	0,86	2,02	87
5:30	34,4	15,0	6,56	1,76	0,39	0,41	21,4	0	0,21	28,94	88
6:30	45,5	13,0	12,95	5,82	0,91	0,84	23,0	0	0,82	89,22	79
7:30	41,8	12,0	19,31	19,96	1,31	0,45	23,8	0	0,7	167,53	72
8:30	37,6	23,0	20,73	14,67	1,41	0,64	25,9	0	0,52	351,15	64
9:30	45,3	16,0	20,69	14,66	1,32	0,53	29,6	0	0,99	704,32	48
10:30	39,9	6,0	15,69	23,35	1,25	0,43	30,9	0	1,53	667,11	42
11:30	27,2	18,0	16,03	36,75	1,17	0,48	31,6	0	1,88	711,4	43
12:30	33,5	13,0	16,57	38,8	0,99	0,42	32,3	0	2,1	639,55	41
13:30	29,1	11,0	8,47	37,17	0,93	0,25	32,6	0	2,12	595,6	38
14:30	23,1	6,0	9,21	30,18	0,86	0,26	32,4	0	2,12	551,69	40
15:30	17,9	4,0	6,99	31,69	0,77	0,22	31,9	0	2,08	376,27	41
16:30	14,2	11,0	7,41	40,62	0,74	0,29	29,7	0	1,87	302,74	46
17:30	17,4	9,0	9,47	54,74	0,71	0,49	29,5	0	1,17	130,9	47
18:30	27,3	8,0	8,74	26,23	0,5	0,5	28,7	0	1,02	22,46	50
19:30	33,3	8,0	7,85	25,72	0,26	0,6	27,6	0	0,74	1,27	56
20:30	41,2	9,0	11,1	10,16	0,22	0,62	27,1	0	0,81	1,87	57
21:30	35,6	12,0	8,9	5,23	0,18	0,39	26,3	0	0,98	0,88	60
22:30	34,1	10,0	4	4,5	0,1	0,48	25,4	0	0,71	1,99	66

Fonte: O autor

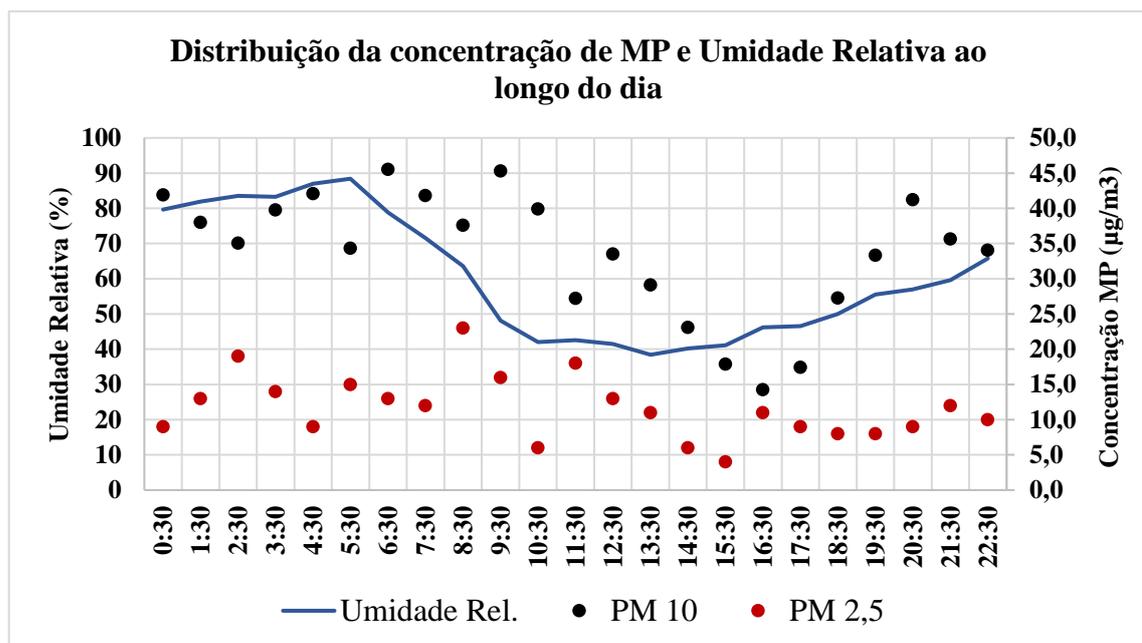
Nos Gráficos 23 e 24 é apresentado a distribuição dos poluentes MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> juntamente com o parâmetro umidade relativa.

**Gráfico 23** - Distribuição da concentração de MP e umidade relativa no dia 05/01/2019 na Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 24** - Distribuição da concentração de MP e umidade relativa no dia 05/01/2019 na Avenida do Contorno

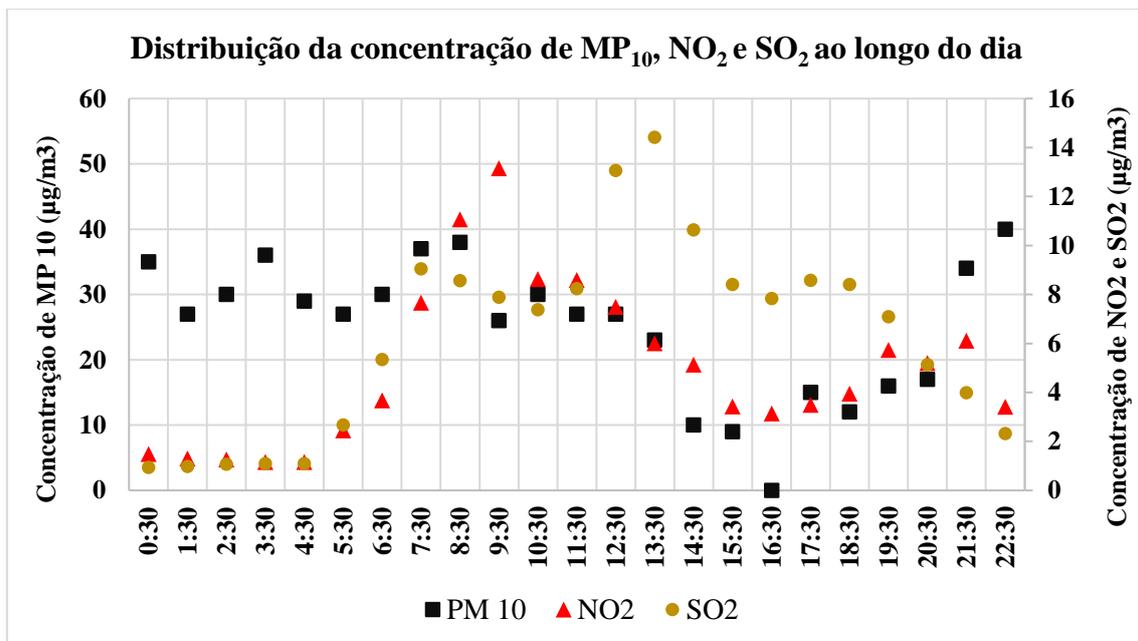


Fonte: O autor.

Pela análise dos gráficos anteriores, percebe-se um comportamento semelhante do material particulado inalável e respirável, em ambas as estações de monitoramento. De 0h30min às 08h30min é notável que a concentração de  $MP_{10}$  fica oscilando entre os valores próximos de 35 a  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , enquanto a de  $MP_{2,5}$  oscila entre 15 e  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ambos os poluentes atingindo valores mais altos entre 7h30min e 8h30min, horários que podem ser facilmente associados a maior fluxo de veículos nas avenidas. Percebe-se também que no período da tarde há um decréscimo das concentrações, quando atingem valores mínimos entre às 15h30 min e 16h30min:  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $MP_{10}$ ) e  $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $MP_{2,5}$ ) na Avenida Amazonas e  $14,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $MP_{10}$ ) e  $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $MP_{2,5}$ ) na Avenida do Contorno. Com relação à umidade relativa, esperava-se obter uma relação inversa no seu comportamento ao longo do dia em relação aos poluentes, no entanto, como se pode observar, a curva desse parâmetro acompanha a distribuição dos poluentes. No entanto, convém destacar que nesse dia não foi observada precipitação em nenhuma das estações.

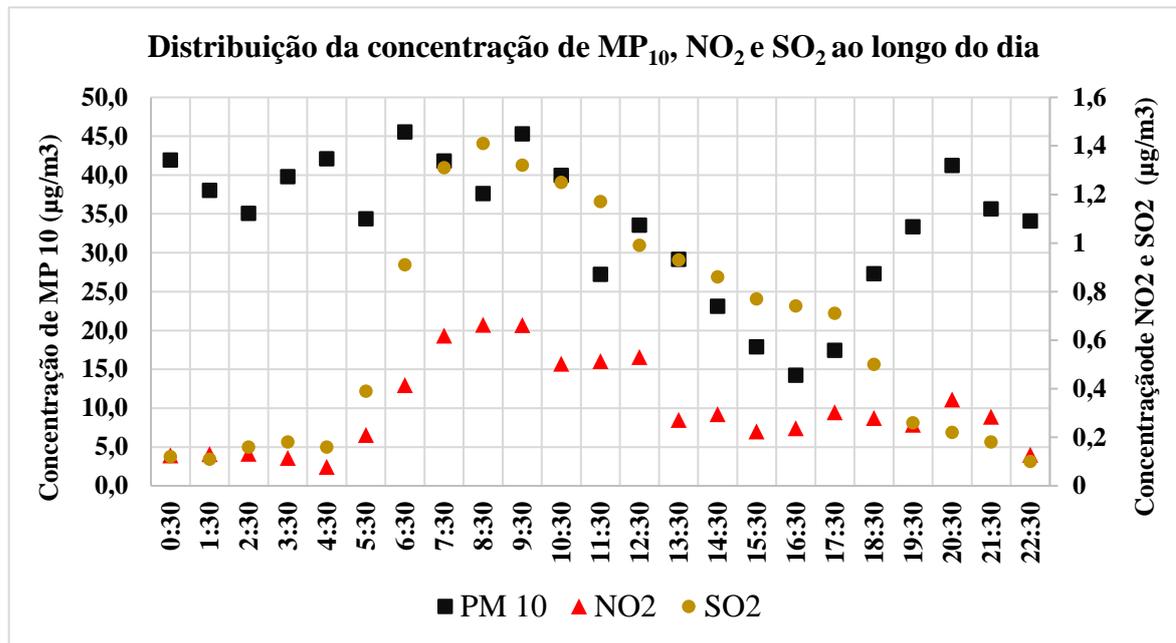
Nos Gráficos 25 e 26 (p.85) é exibido a distribuição dos poluentes  $MP_{10}$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  durante o dia analisado.

**Gráfico 25** - Distribuição da concentração de  $MP_{10}$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  no dia 05/01/2019 na Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 26** - Distribuição da concentração de MP<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> no dia 05/01/2019 na Avenida do Contorno

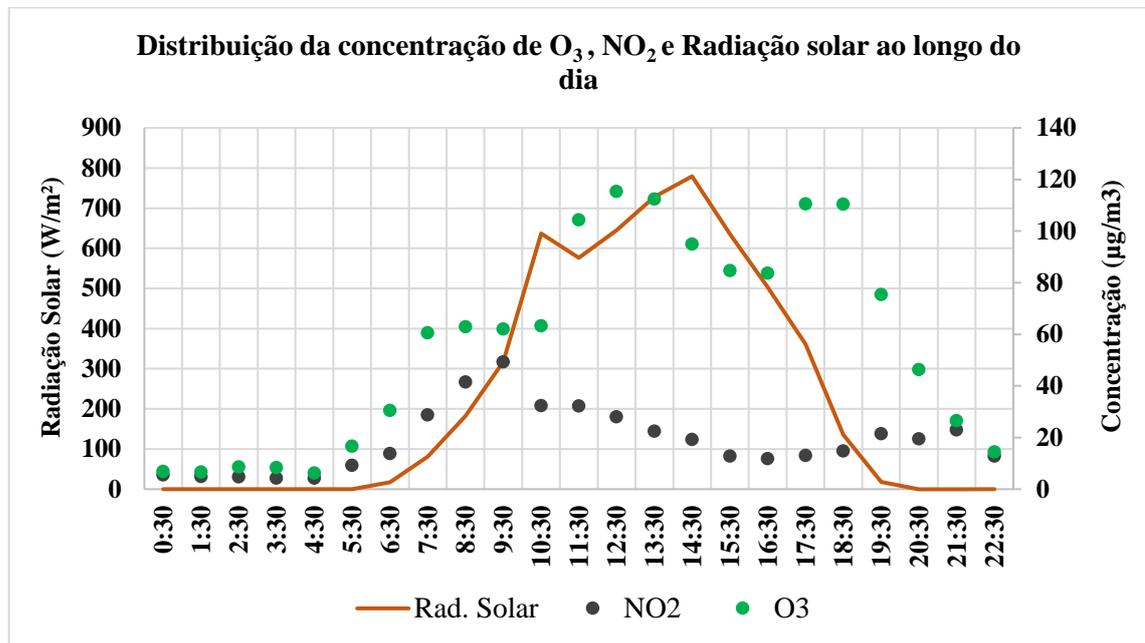


Fonte: O autor.

Analisando os gráficos 25 e 26, percebe-se um comportamento semelhante dos dióxidos de nitrogênio e enxofre, os quais têm ponto de alta e baixa coincidentes, sobretudo na estação localizada na Avenida do Contorno. Isso era esperado, uma vez que ambos são oriundos dos processos de combustão dos veículos. Infere-se que há relação dessas emissões com veículos pesados movidos a diesel. Na estação da Avenida Amazonas, importa destacar os horários de 08h30min e 09h30min, quando os níveis de NO<sub>2</sub> no ar são bem elevados, superando inclusive a concentração de material particulado. Outro ponto de destaque é quanto ao dióxido de enxofre próximo do meio-dia, quando a sua concentração atinge um pico e o máximo observado no dia (14,42 µg/m<sup>3</sup>).

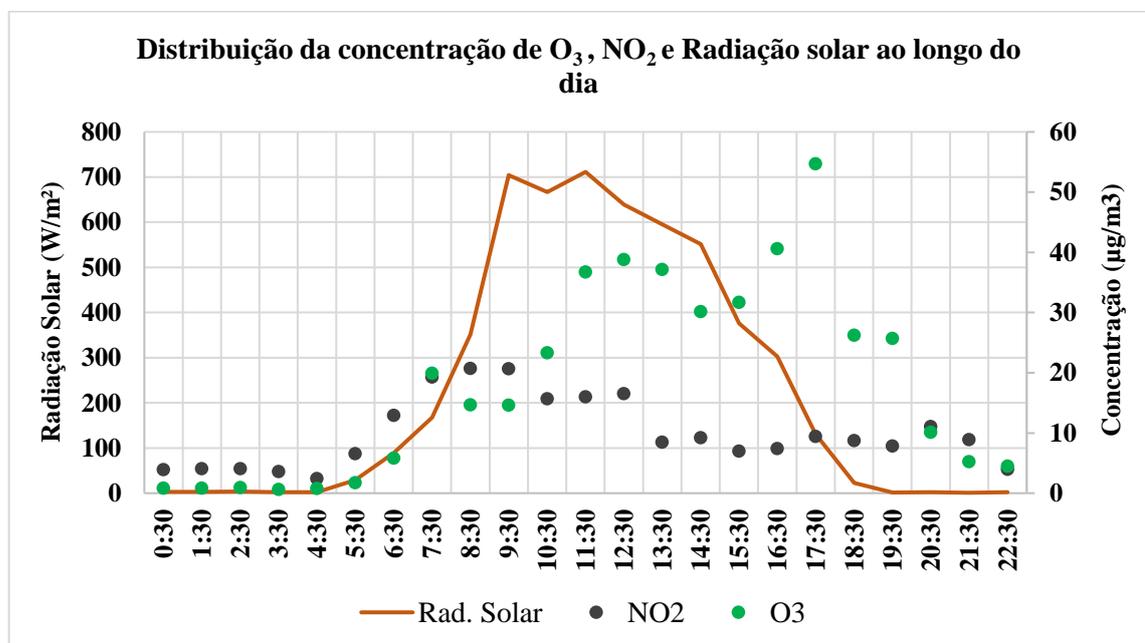
Em seguida, nos Gráficos 27 (p.86) e 28 (p.86) é apresentado a distribuição horária dos poluentes O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e a radiação solar, nas estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, respectivamente.

**Gráfico 27** - Distribuição da concentração de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e radiação solar no dia 05/01/2019 na Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

**Gráfico 28** - Distribuição da concentração de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e radiação solar no dia 05/01/2019 na Avenida do Contorno



Fonte: O autor.

Os gráficos apresentados acima permitem ver a relação do ozônio e seus precursores, o dióxido de nitrogênio e a radiação solar. A influência desta última na formação de O<sub>3</sub> mostra-se nítida,

uma vez que logo após os picos de radiação, tem-se também os picos na concentração de ozônio, o que ocorre a partir de 11h30min. Na estação localizada na Avenida Amazonas, ocorrem dois picos na concentração de  $O_3$ : o primeiro entre 11h30min e 13h30min e os segundo entre 17h30min e 18h30min. Já na estação da Avenida do Contorno, também é perceptível um salto na concentração do poluente secundário entre os horários de 11h30min e 13h30min, mas os maiores valores são atingidos no fim da tarde, entre 16h30min e 17h30min. Com relação ao dióxido de nitrogênio, observa-se um aumento da sua concentração nas primeiras horas da manhã (a partir de 7h30min) e no início da noite (a partir de 19h30min, no caso da Av. Amazonas e a partir de 20h30min no caso da Av. do Contorno), sendo este último um aumento mais sutil, porém ambos coincidem com a hipótese de ser nos horários em que o fluxo de veículos na via aumenta.

Outros autores que avalizaram a variação horária do ozônio e seus precursores, chegaram a conclusões semelhantes: Bucco (2010), por exemplo, encontrou picos na concentração média de  $NO_2$  nos horários de 7h e 18h e de  $O_3$  às 13h para uma estação localizada na cidade de Curitiba (PR). Já Silva (2019) também observou que o ozônio segue o mesmo ciclo representado pela temperatura, diretamente associada à radiação solar, além de que encontrou valores máximos por volta de 12h e 14h, coincidindo com picos de temperatura, na cidade do Rio de Janeiro. Com relação ao  $NO_2$ , o autor observou uma crescente nas primeiras horas da manhã e no fim da tarde. Esse padrão pode estar associado ao processo natural de inversão térmica que ocorre na escala de tempo do dia, caracterizada por uma estabilização temporária da atmosfera em decorrência da mudança da incidência de radiação solar.

### **5.5 Análise de Correlação linear**

Na Tabela 12 (p. 88) são apresentados os valores dos coeficientes de correlação de Pearson referente aos dados de poluentes ( $MP_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $MP_{2,5}$  e  $CO$ ) e parâmetros meteorológicos (temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, radiação solar e umidade relativa), para as estações de monitoramento localizadas na Avenida Amazonas e Avenida do Contorno. Convém ressaltar que foram empregados os mesmos dados brutos utilizados para avaliação de estatística descritiva, ou seja, após uma pré-seleção que excluiu os dados faltantes do banco geral fornecido pela FEAM. As correlações significativas consideradas neste trabalho foram acima de 0,5 em módulo e estão destacadas em negrito.



Com relação ao material particulado, foram encontradas correlações fortes e positivas entre o  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  em ambas as estações e entre o material particulado inalável e respirável com o CO na estação da Avenida Amazonas. Esta forte relação é explicada pelo fato de serem produtos diretos dos processos de combustão, estão fortemente associados. Convém destacar que foi possível observar uma relação negativa entre os MPs e precipitação ou ainda entre eles e a umidade relativa na estação da Avenida do Contorno, porém não considerável. Era esperado que ela fosse mais forte. Apesar da indicação da correlação negativa em alguns cruzamentos, como é possível observar na Tabela 12, foram todas consideradas fracas.

Nicodemos *et al.* (2010) obteve uma correlação de -0,268 entre Umidade Relativa e  $MP_{10}$  e de -0,494 entre Precipitação e  $MP_{10}$  para os dados da cidade de Uberlândia (MG), portanto mais relevantes. Uma possível explicação para isso é o número reduzido de dados utilizados neste trabalho, em detrimento do trabalho dos autores, que trabalharam com o período de 2003 a 2007.

Lyra, Oda-Souza e Viola (2011), ao avaliarem a influência de fatores meteorológicos na estimativa da concentração de  $PM_{10}$  na cidade do Rio de Janeiro por meio de modelos de regressão linear múltipla, chegaram à conclusão de que a variável mais significativa foi a umidade do ar, seguida pela precipitação, enquanto a direção do vento mostrou-se estatisticamente menos significativa. Já a temperatura do ar mostrou-se não significativa na variação da concentração desse poluente. Também foram obtidos coeficientes negativos entre os parâmetros umidade relativa, precipitação, velocidade dos ventos e pressão atmosférica e a concentração de  $PM_{10}$ , indicando uma correlação inversa. Ao traçar relações entre a umidade relativa e a concentração de material particulado, os autores explicam que nos dias secos, à baixa umidade, existe tendência de aumento da contribuição da ressuspensão do solo para o particulado atmosférico, principalmente quando se observa elevadas velocidades do vento. Ainda, a umidade relativa está diretamente ligada aos eventos de precipitação.

Com relação à precipitação, o coeficiente negativo remete ao processo de deposição úmida e diminuição da ressuspensão do solo, ou seja, durante os eventos de chuva percebe-se diminuição na concentração de material particulado. Já para a velocidade do vento, espera-se que quanto maior seu valor, maior também será a taxa de dispersão de material particulado, ou seja, sua concentração na atmosfera será menor, estabelecendo uma relação inversa.

Foi observado também uma correlação forte entre  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  na estação da Avenida Amazonas e dele com o CO na estação da Avenida do Contorno, novamente evidenciando a relação dos poluentes oriundos dos processos de queima de combustíveis, com destaque para o óleo diesel.

Com relação ao ozônio, não foi observada nenhuma correlação forte na Avenida Amazonas, provavelmente devido ao número reduzido de dados. Em contrapartida, na Avenida do Contorno, onde houve maior número de dados disponíveis, já foi possível destacar correlações positivas fortes entre esse poluente secundário e a temperatura (0,6530) e radiação solar (0,5124), corroborando com o que já foi discutido para esse poluente. Além disso, observou-se uma forte relação negativa entre esse poluente e a umidade relativa (-0,7043). A hipótese que surge é que o aumento da umidade relativa pode contribuir para a remoção dos precursores de ozônio, ou seja, de COVs e  $\text{NO}_x$ .

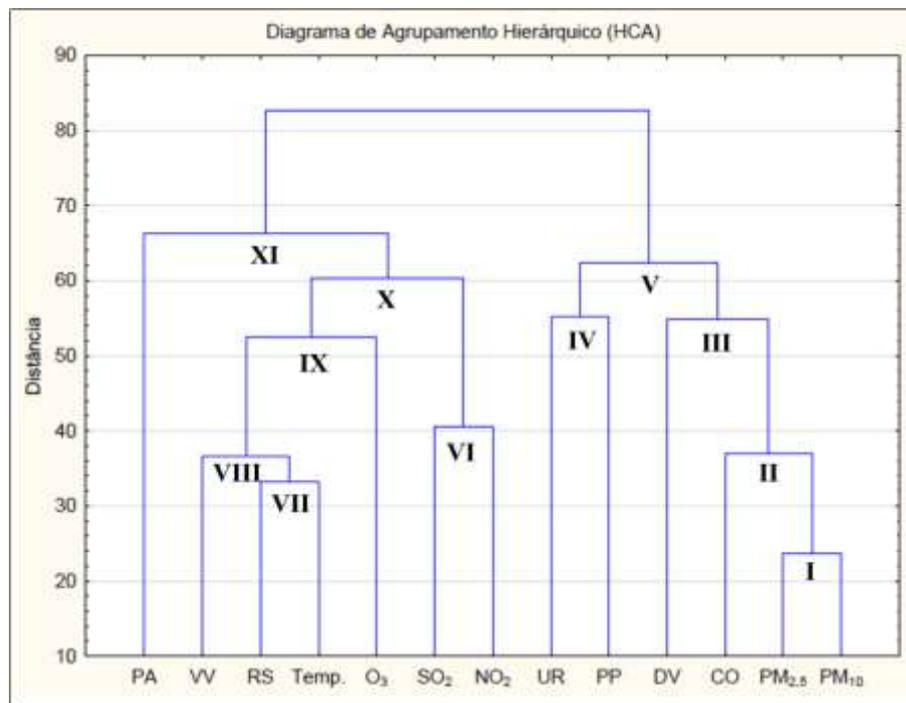
Além dessas, observa-se também correlação relevante positiva entre o  $\text{SO}_2$  e temperatura na estação da Avenida Amazonas. Correlações dos parâmetros meteorológicos entre si também foram observadas, por exemplo, correlação positiva da temperatura com radiação solar e desta com a umidade relativa, do tipo inversa.

## **5.6 Análise Multivariada – Gráficos de HCA e PCA**

### *5.6.1 HCA*

Os dendrogramas obtidos para as estações de monitoramento localizadas na Avenida Amazonas e Avenida do Contorno são apresentados nos Gráficos 29 (p. 91) e 30 (p. 93), respectivamente. Foram atribuídos algarismos romanos aos agrupamentos formados, de forma a facilitar a análise e discussão dos resultados.

**Gráfico 29** – Dendrograma de Agrupamento Hierárquico (HCA) referente aos dados da Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

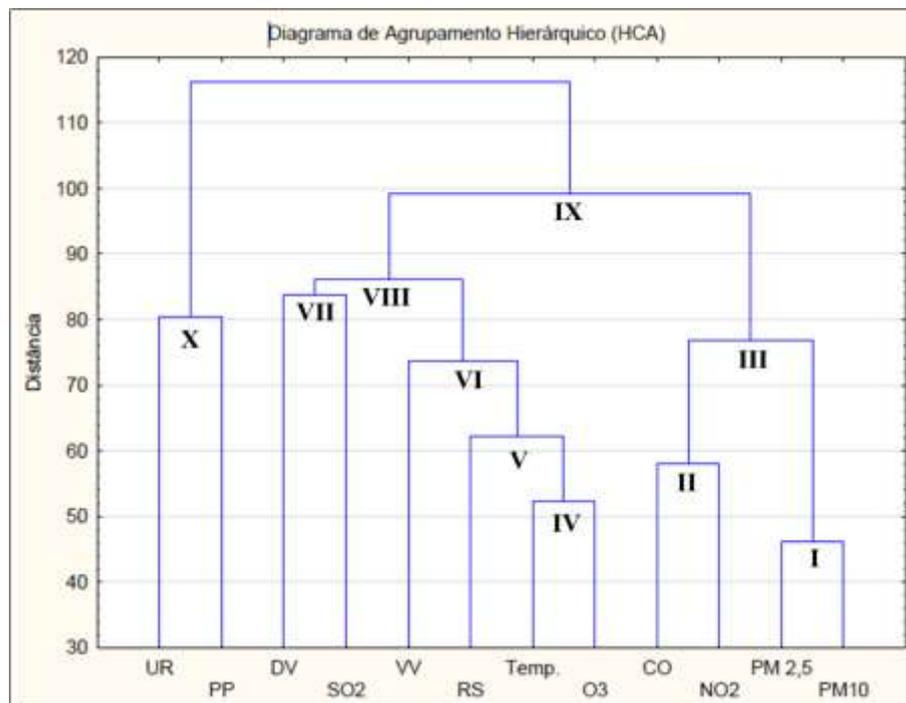
A partir da análise do Gráfico acima, observa-se que o agrupamento de maior destaque é dos materiais particulados inaláveis e respiráveis (I). Essa união era esperada, dado que os poluentes também apresentaram uma correlação forte, como apresentado no subitem anterior. Junto deles, formando um segundo agrupamento (II), está o monóxido de carbono (CO), reunindo assim os poluentes emitidos pelo processo de combustão, o que está em consonância com o local de monitoramento, uma avenida com alto fluxo diário de veículos, tanto leves como pesados. O terceiro agrupamento formado (III) foi dos poluentes oriundos da combustão e a direção dos ventos (DV). Este último foi um parâmetro meteorológico pouco explorado nas análises deste trabalho por razão da necessidade do tratamento dos dados brutos desse parâmetro para uma melhor interpretação, os quais são dados em graus ( $^{\circ}$ ). Analisando esse agrupamento formado, é possível levantar a hipótese de que a direção dos ventos pode sim estar relacionada à concentração dos poluentes oriundos dos processos de queima, atuando como fator de dispersão, ou seja, a direção dos ventos pode ser favorável (ou não) a esse fenômeno. Por outro lado, é possível dizer que este agrupamento, apesar de mostrar uma relação entre os parâmetros, não é tão expressivo, dada a distância euclidiana (cerca de 55). A mesma avaliação pode ser feita para o quarto agrupamento, formado pela união da precipitação (PP) e umidade relativa (UR). Com relação a estes dois parâmetros meteorológicos, a hipótese que os une aos demais poluentes citados é o processo de deposição úmida e atenuação do fenômeno de ressuspensão

de material particulado do solo, como já discutido. Por fim, percebe-se que esses parâmetros (MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, CO, DV, PP e UR) formam um grande grupo (V), estando todos relacionados de alguma maneira.

Outro agrupamento visível (VI) reuniu os dióxidos de nitrogênio e de enxofre, ambos também provenientes dos processos de queima de combustíveis e ambos atuantes no fenômeno do smog fotoquímico, além de serem causadores das chuvas ácidas. Há também que destacar o agrupamento (VII) da temperatura (Temp.) e radiação solar (RS), que apresentaram uma relação expressiva, dada a distância euclidiana observada (cerca de 32), o que é facilmente explicado pela influência que a segunda tem na primeira. Esse grupo formou outro agrupamento (VIII) com o parâmetro velocidade dos ventos (VV) que, por sua vez, agruparam com o poluente ozônio (IX). Essa relação corrobora com a literatura, uma vez que a taxa de radiação solar, a qual atua diretamente na temperatura do ar, é um dos fatores atuantes no processo de formação deste poluente secundário, o ozônio troposférico, visto que este é gerado na troposfera a partir de reações fotoquímicas de seus precursores. Por fim, fecha-se o segundo grande agrupamento (X) com a união dos grupos VI e IX, reunindo os parâmetros NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Temperatura, RS e VV.

Convém mencionar que o parâmetro pressão atmosférica, um dos dados de entrada, encontra-se isolado na extrema esquerda do gráfico. Apesar de observada sua junção com o grupo X, formando o agrupamento XI, a distância euclidiana apresentada denota sua pouca similaridade com os demais agrupamentos. Além disso, para esse gráfico apresentado, é possível afirmar que os agrupamentos acima da distância de 40 são formados pelo *software* de forma forçada, por isso os demais merecem maior destaque.

**Gráfico 30** – Dendrograma de Agrupamento Hierárquico (HCA) referente aos dados da Avenida do Contorno



Fonte: O autor.

O dendrograma referente à estação de monitoramento da Avenida do Contorno, apresentado no gráfico anterior, contém algumas semelhanças e algumas diferenças em relação ao primeiro. Convém destacar que, para este gráfico, os agrupamentos acima da distância de 65 são formados pelo *software* de forma forçada, por isso os demais merecem maior destaque. A primeira semelhança é em relação ao primeiro agrupamento, de maior significância, também formado pelos poluentes  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ . Outra semelhança trata-se da união deles com o monóxido de carbono no agrupamento III, porém este poluente agrupou-se antes, isto é, de forma mais relevante com o poluente dióxido de nitrogênio, os quais formaram o agrupamento II. Ainda que haja essa diferença em relação ao Gráfico 29, observa-se que se manteve a lógica de reunir poluentes oriundos da combustão de combustíveis fósseis.

Outro agrupamento semelhante observado foi do ozônio com a temperatura (Temp.), porém aqui de forma direta, formando o agrupamento IV que, por sua vez, junta-se com a radiação solar (RS), formando o agrupamento V. Assim como já observado, aqui a velocidade do vento (VV) também se relaciona com esses outros parâmetros, juntando-se a eles no agrupamento VI.

Cabe mencionar os agrupamentos VII (direção dos ventos e  $SO_2$ ) e X (precipitação e umidade relativa), que apresentaram distâncias euclidianas próximas (cerca de 80). Com relação ao

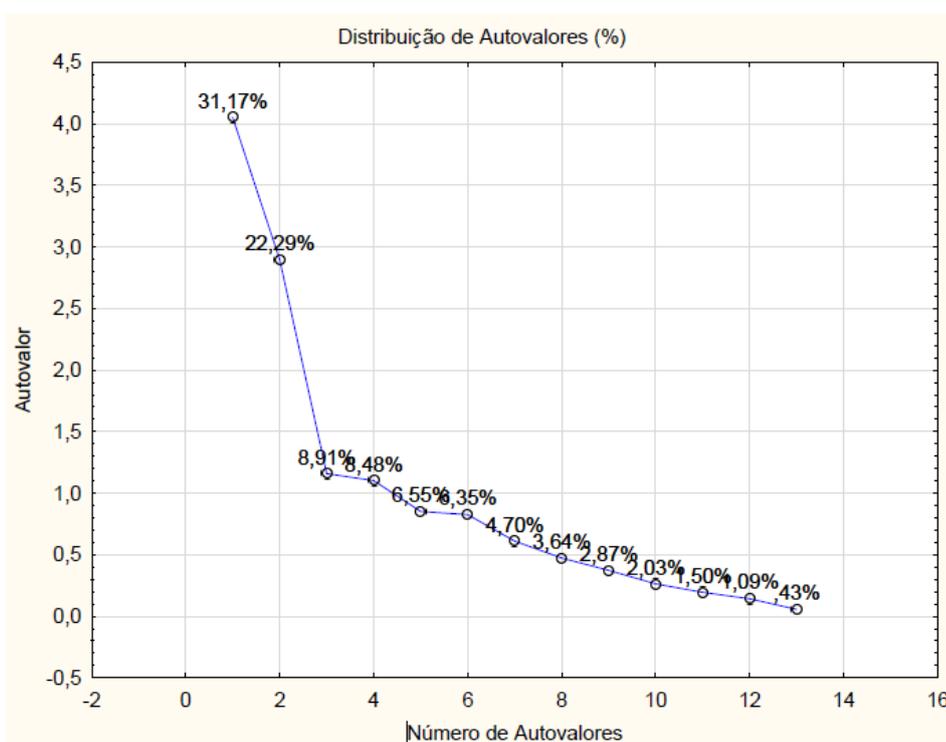
agrupamento VII, foi uma novidade em relação ao apresentado no Gráfico 29 e, apesar de existir a hipótese da direção dos ventos atuar como fator de dispersão do dióxido de enxofre, essa relação não pode ser considerada muito relevante. Observa-se que esse agrupamento junta-se com o VI, formando o agrupamento VIII que, por sua vez, alia-se ao agrupamento III, formando um grande grupo (IX). Já com relação ao grupo X, formado pelas variáveis umidade relativa e precipitação, também observado no Gráfico 29, aqui essa relação apresentou-se menos considerável, dada sua distância euclidiana, e pelo fato de estar afastado dos demais grupos. Há que se destacar a relação inversa entre essas variáveis e os demais poluentes, visto que elas atuam justamente na sua remoção da atmosfera.

### 5.6.2 PCA

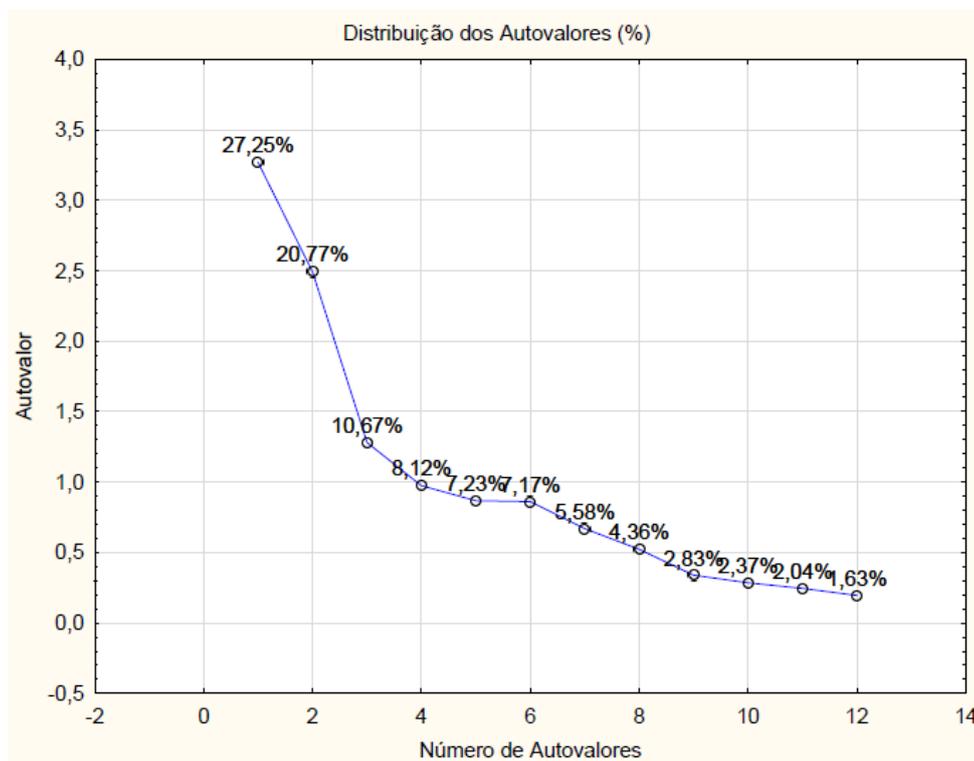
Na sequência, é apresentada a análise de componentes principais. Convém frisar que as análises de HCA e PCA se completam, pois a primeira serve para confirmar se as variáveis que estão num mesmo grupo são as mesmas que explicam determinado fator.

Os gráficos de distribuição de componentes principais obtidos para as estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno são apresentados nos Gráficos 31 e 32 (p.96), respectivamente.

**Gráfico 31** – Distribuição de Componentes Principais para dados da Avenida Amazonas



Fonte: O autor

**Gráfico 32** – Distribuição de Componentes Principais para dados da Avenida do Contorno

Fonte: O autor.

Observando o Gráfico 31, percebe-se que os três componentes principais (CP) utilizados para análise de componentes principais comados correspondem a 62,37%, distribuídos em 31,17% para o CP1, 22,29% para o CP2 e 8,91% para o CP3.

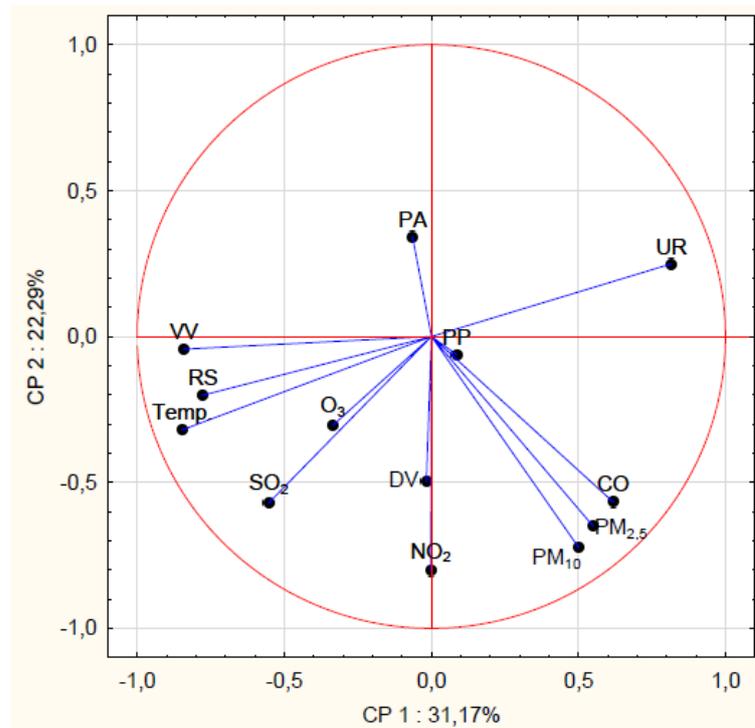
Para a estação da Avenida do Contorno, os três componentes principais explicam, juntos, cerca de 59% do modelo. O CP1 apresentou um autovalor de 27,25%, já o CP2 apresentou um autovalor de 20,77% e, por fim, o CP3 apresentou um autovalor de 10,67%.

Convém ressaltar que, embora a soma ideal seja em torno de 70%, como já destacado anteriormente, foram utilizadas somente as três primeiras componentes principais pelo fato de que a inclusão da quarta não contribuiu substancialmente na discussão dos resultados.

Dessa forma, para cada estação de monitoramento, foram gerados três gráficos de dispersão (planos fatoriais) com as seguintes combinações: (1) CP1 com CP2; (2) CP2 com CP3; e (3) CP1 com CP3, sendo que os grupos apresentados nos gráficos são formados por similaridades de explicação.

São apresentados nos gráficos 33, 34 (p. 98) e 35 (p. 99) os gráficos de PCA, na mesma sequência de combinação, para os dados da Avenida Amazonas.

**Gráfico 33** – Plano fatorial dos componentes CP1 x CP2 – Avenida Amazonas



Fonte: O autor.

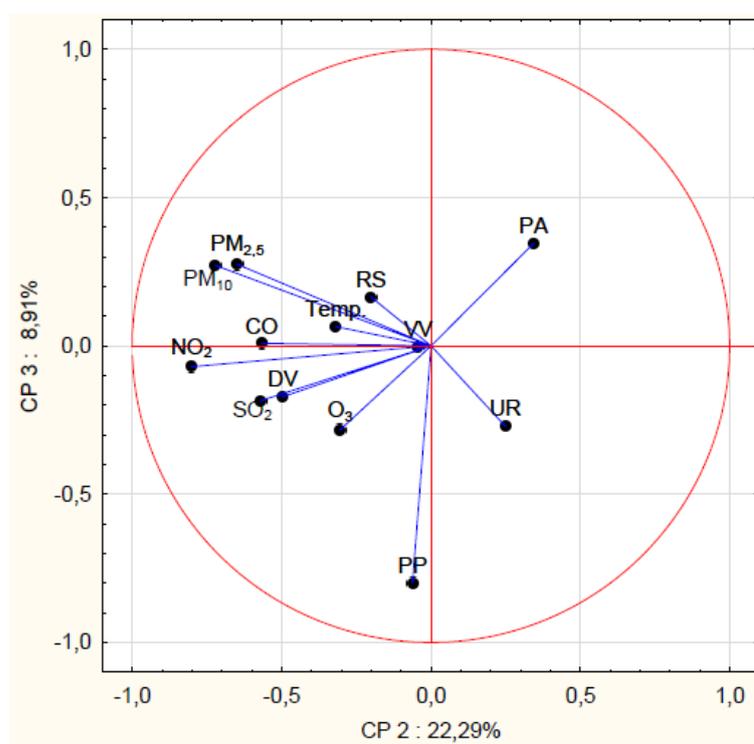
A partir do primeiro gráfico de nuvem das variáveis no círculo de correlações (plano fatorial), é possível observar, em uma análise geral, pela proximidade do círculo unitário (círculo em vermelho), que as variáveis de maior contribuição são PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, CO, UR, VV, RS e Temp.

Analisando pelo fator 1, de maior relevância (CP1: 31,17%), observa-se que de um lado (direito) estão as variáveis umidade relativa (UR), precipitação (PP), monóxido de carbono (CO), material particulado respirável (PM<sub>2,5</sub>) e material particulado inalável (PM<sub>10</sub>), denotando uma relação entre elas. É possível dizer que, dentre essas variáveis, as que mais contribuem para a explicação dessa relação são as que estão mais afastadas da origem, isto é, UR, CO, PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>, além de que existe uma relação inversa entre a UR e as demais, por estarem posicionadas em quadrantes opostos. Ainda em relação ao eixo X, porém do outro lado (esquerdo), tem-se as variáveis pressão atmosférica (PA), velocidade dos ventos (VV), radiação solar (RS), temperatura (Temp.), ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), direção dos ventos (DV) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Dentre elas, as que mais contribuem para a relação existente são VV, RS, Temp. e SO<sub>2</sub>, pelo fato de estarem mais afastadas da origem do eixo. Há

ainda que ressaltar que com exceção da pressão atmosférica, todas elas possuem uma relação direta, por estarem localizadas no mesmo quadrante. Ainda, pela proximidade do eixo, convém ressaltar que as variáveis PA, PP, DV e NO<sub>2</sub> pouco explicam a relação entre as variáveis, em relação ao fator CP1. Com relação ao ozônio, radiação solar e temperatura, pode-se perceber a presença deles no mesmo quadrante, atestando para a relação direta entre essas variáveis. Além disso, percebe-se uma aproximação entre o ozônio e o dióxido de enxofre no gráfico. A hipótese dessa associação seria que nos veículos pesados, movidos a diesel, a combustão incompleta favorece maior emissão de COVs, os quais são precursores de ozônio.

Já com relação ao fator 2 (CP 2: 22,29%), orientado pelo eixo Y, de um lado (superior) estão as variáveis pressão atmosférica e umidade relativa, enquanto do outro lado (inferior) estão as demais. Analisando pela distância em relação à origem, as de maior relevância na explicação da relação são as variáveis SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>, ou seja, os poluentes primários oriundos dos processos de combustão.

**Gráfico 34** - Plano fatorial das componentes CP2 x CP3 – Avenida Amazonas

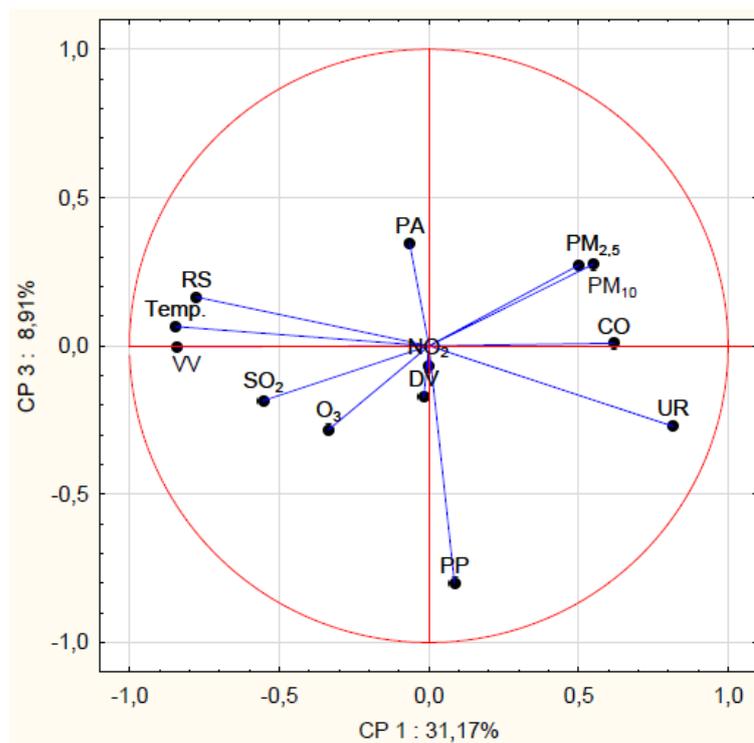


Fonte: O autor.

Em relação ao Gráfico 34, que traz o fator 3 (CP3: 8,91%) para a análise, percebe-se maior contribuição da variável precipitação (PP), pela sua distância da origem em relação ao eixo Y. Sua localização em quadrante oposto aos poluentes PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>, por exemplo, denota sua

relação inversa com eles, o que até então não estava tão visível. Na verdade, maiores índices de precipitação contribuem diretamente para remoção de todos os poluentes atmosféricos destacados nesse trabalho.

**Gráfico 35** - Plano fatorial das componentes CP1 x CP3 – Avenida Amazonas

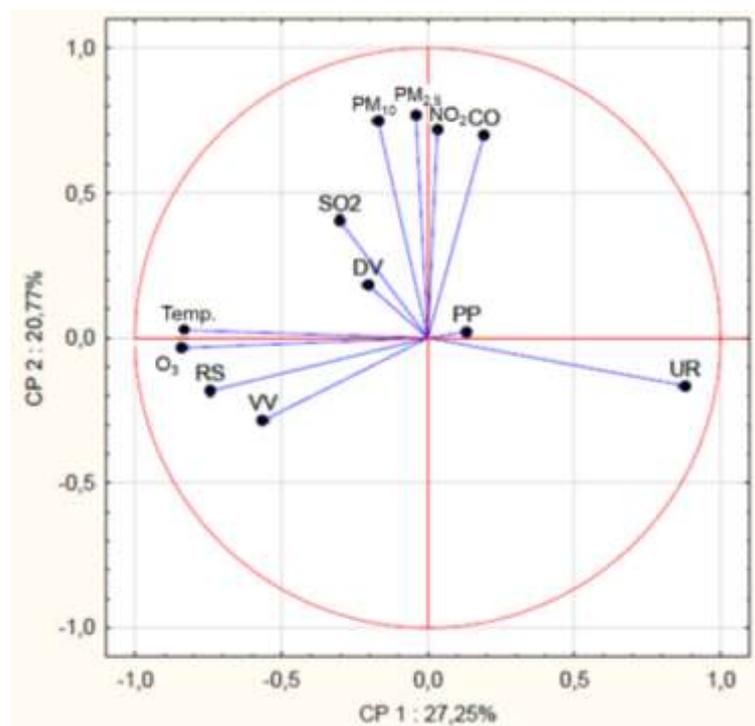


Fonte: O autor.

O Gráfico 35 traz o plano vetorial dos fatores 1 e 3. Analisando pelo fator 1 (CP1:31,17%), orientado pelo eixo X, é visível do lado positivo (direito), o posicionamento dos poluentes  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ , CO, UR e PP, mostrando a relação entre eles. Aqui, torna-se claro a proximidade dos poluentes em detrimento da posição dos parâmetros meteorológicos umidade relativa e precipitação, confirmando a relação inversa entre eles, ainda que com relação ao fator 1 a umidade tenha se mostrado uma variável mais relevante, em contrapartida, com relação ao fator 3, a precipitação coloca-se numa posição de destaque pela proximidade ao círculo unitário. Do outro lado, encontram-se as demais variáveis, à semelhança do que já foi apresentado e discutido para o Gráfico 34. Convém destacar a proximidade das variáveis  $NO_2$  e DV da origem do plano, mostrando que essas variáveis não contribuem na explicação das relações expostas por esse gráfico.

Na sequência, são apresentadas os Gráficos 36, 37 (p. 101) e 38 (p. 102), os quais trazem os gráficos de PCA para os dados da Avenida do Contorno, obedecendo a mesma sequência de combinação.

**Gráfico 36** - Plano fatorial das componentes CP1 x CP2 – Avenida do Contorno



Fonte: O autor.

O primeiro gráfico plano vetorial da Avenida Amazonas traz as relações entre as variáveis de estudo, conforme o agrupamento determinado pelos fatores 1 (CP1: 27,25%) e 2 (20,77%). A análise geral do gráfico mostra a relevância das seguintes variáveis na explicação das relações traçadas: umidade relativa (UR), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), material particulado respirável (PM<sub>2,5</sub>), material particulado inalável (PM<sub>10</sub>), temperatura (Temp.), ozônio (O<sub>3</sub>) e radiação solar (RS).

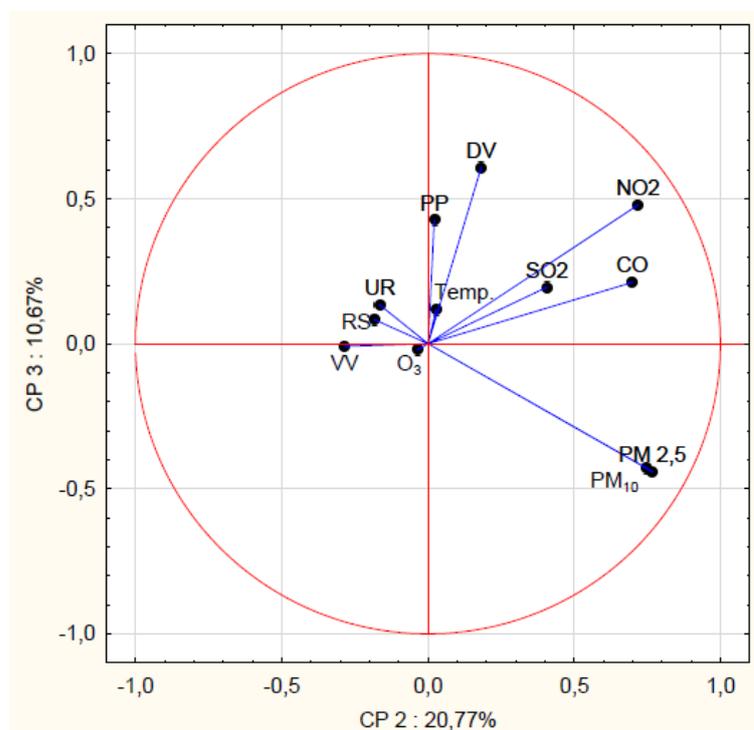
Com relação ao fator 1, de maior relevância (CP1:27,25%), observa-se o agrupamento formado do lado esquerdo das variáveis temperatura, ozônio, radiação solar e velocidade dos ventos, todas elas significantes do ponto de vista desse fator, dada sua distância da origem. Esse agrupamento relaciona os parâmetros meteorológicos radiação solar, temperatura e, em menor escala, a velocidade dos ventos, com o poluente ozônio, o que era esperado, corroborando essa influência e relação direta. Do outro lado (direito), a variável umidade relativa aparece em posição de destaque, pela sua relevância, fazendo oposição, ou melhor, sugerindo uma relação inversa a esse primeiro grupo de variáveis. Por fim, cabe mencionar que, devido à proximidade

do eixo, as variáveis PP, DV, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> pouco explicam a relação traçada pelo fator CP1.

A visão geral do gráfico apresentado mostra uma separação clara entre os parâmetros meteorológicos que contribuem na remoção dos poluentes, a saber, umidade relativa e precipitação, daqueles que favorecem as reações fotoquímicas e, portanto, atuam na formação de poluentes secundários, como o ozônio, que é o caso da temperatura e radiação solar. Ainda, no lado superior, reúnem-se os poluentes, separados dos parâmetros meteorológicos.

Já em relação ao fator 2 (CP2: 20,77%), as variáveis de destaque formam um grupo na parte superior do gráfico, quais sejam, CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>. Assim como observado na Avenida Amazonas, esse agrupamento traça uma relação direta entre os poluentes primários oriundos dos processos de combustão. As demais variáveis, pela sua proximidade à origem do eixo, explicam pouco as relações traçadas pelo fator 2.

**Gráfico 37** - Plano fatorial das componentes CP2 x CP3 – Avenida do Contorno



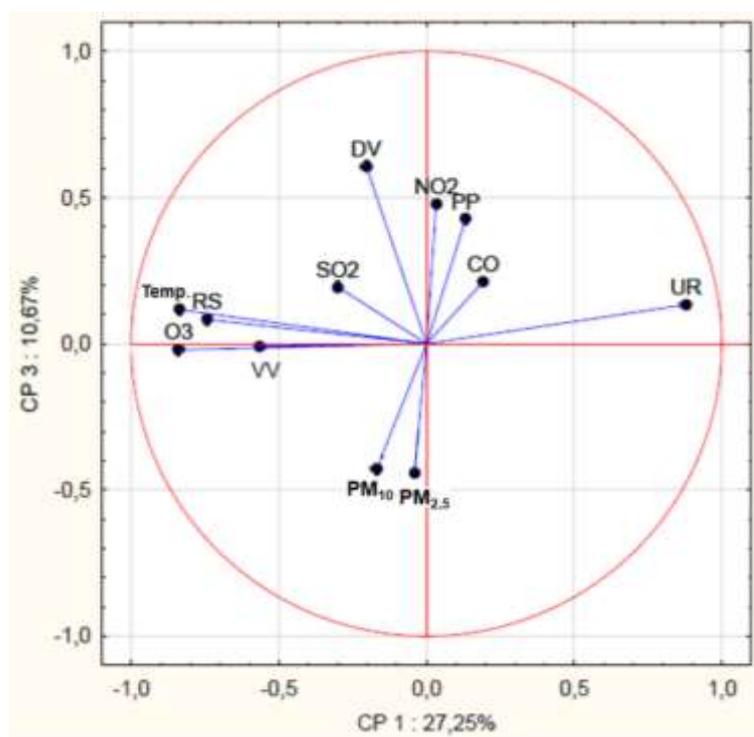
Fonte: O autor.

Analisando o Gráfico 37, que traz o plano vetorial os fatores 2 (CP2:20,77%) e 3 (CP3: 10,67%), observa-se que as variáveis que mais contribuem para a explicação das relações traçadas são: PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub> e DV. Convém destacar que os materiais particulados

respirável e inalável estão quase em sobreposição, o que indica a mesma representatividade no gráfico.

Com relação ao fator 3, convém destacar que nenhuma variável obteve grande destaque em termos da sua contribuição na explicação, visto que quase todas elas se encontram entre o intervalo de -0,5 e 0,5 em relação ao eixo Y, com exceção da direção dos ventos (DV) que passa um pouco esse limite. No entanto, considerando a proporção da escala que se apresenta, a partir da avaliação da posição das variáveis nos quadrantes, o gráfico sugere uma relação inversa entre o grupo dos poluentes  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  em relação aos parâmetros meteorológicos precipitação (PP) e direção dos ventos (DV). Assim como no Gráfico 36, é possível notar uma separação entre os parâmetros meteorológicos e os poluentes, em relação ao eixo Y.

**Gráfico 38** - Plano fatorial das componentes CP1 x CP3 – Avenida do Contorno



Fonte: O autor

O Gráfico 38 traz o gráfico plano vetorial dos fatores 1 (CP1: 27,25%) e 3 (CP3:10,67%). É possível observar que o agrupamento dos materiais particulados respirável e inalável ( $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ ), localizado na parte inferior, está em oposição aos demais parâmetros, localizados na parte superior, assim como observado no Gráfico 35. No eixo X, tem-se o agrupamento das variáveis temperatura, radiação solar, ozônio e velocidade dos ventos no lado esquerdo, fazendo oposição à umidade relativa, localizada no lado direito, como já discutido para o Gráfico 36.

Dessa forma, é possível notar que as explicações se coincidem analisando os gráficos com as 3 combinações, corroborando a explicação de que incluir uma quarta componente na discussão não iria contribuir tanto na explicação das relações observadas.

## 6 CONCLUSÕES

A partir da análise conjunta dos dados de concentração de poluentes e dados meteorológicos em Belo Horizonte no ano de 2019, foi possível levantar hipóteses a respeito da poluição atmosférica na cidade, à luz da bibliografia consultada, e observar que, apesar da complexidade existente nos processos físico-químicos que atuam na atmosfera troposférica, é possível traçar relações entre as variáveis atuantes.

Em termos de concentração de poluentes, as médias obtidas foram maiores na estação localizada na Avenida Amazonas, enquanto para os parâmetros meteorológicos houve similaridade em ambas as estações de monitoramento avaliadas. As diferenças observadas atesta para a atuação da escala local nos eventos atmosféricos, apesar da proximidade entre as estações e de estarem localizadas na mesma cidade. No geral, houve uma alta dispersão dos dados em ambas as estações, dado o alto valor de desvio padrão encontrado para a maioria dos parâmetros.

Com relação ao material particulado inalável ( $MP_{10}$ ), houve ultrapassagem ao limite do Padrão Intermediário 1 (PI-1), atualmente vigente, para a média aritmética anual na Avenida do Contorno. Foram observadas maiores concentrações no período seco, sobretudo nos meses de junho e outubro. Na estação da Avenida Amazonas, não houve nenhum dia em que o PI-1 foi ultrapassado, porém em 10 dias do ano (3,1%) o limite do Padrão Final (PF), preconizado pela OMS, foi excedido. Já na Avenida do Contorno, em 5 dias o PI-1 foi ultrapassado (1,4%), nos meses de julho, setembro e outubro, enquanto o PF foi excedido em 48 dias do ano (13,2%).

Com relação ao material particulado respirável ( $MP_{2,5}$ ), as maiores concentrações foram observadas nos meses de setembro e outubro. Em nenhum dia do ano foi constatado ultrapassagem ao PI-1 em ambas as estações, porém em 28 dias (entre junho e outubro) e 12 dias (entre julho e outubro) o limite do PF foi excedido para as estações da Avenida Amazonas e Avenida do Contorno, respectivamente, o que corresponde a 9,1% e 3,3%.

Com relação ao dióxido de nitrogênio, não foi observada ultrapassagem ao PF ao longo do ano em ambas as estações, que atingiram valores máximos de cerca de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . As maiores concentrações foram observadas entre final de maio e início de agosto, sendo que houve uma maior média na Avenida Amazonas em relação à Avenida do Contorno.

Também, em relação ao dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), não houve nenhum dia que em o PF foi excedido em ambas as estações, sendo que, naquela localizada na Avenida Amazonas, a partir do meio de junho de 2019 os dados não foram registrados. As baixas concentrações ao longo do ano podem ser explicadas pela alta solubilidade do poluente em água e pelo fato de sua oxidação ocorrer rapidamente na atmosfera, convertendo-o para  $\text{SO}_3$ .

Já com relação ao ozônio ( $\text{O}_3$ ), os dados da Avenida Amazonas mostraram uma situação alarmante devido ao registro de altas concentrações no mês de janeiro e no período de março a junho, atingindo um valor máximo de cerca de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em março, valor que representa mais que o dobro do PI-1 atualmente vigente. Convém destacar que os picos na concentração desse poluente podem ter ocorrido também em outra época do ano, mas não foi possível observar devido à falta de dados nesta estação de monitoramento a partir do mês de agosto. Já na estação da Avenida do Contorno, a qual contempla todo o ano, as maiores concentrações foram observadas em setembro e outubro, porém abaixo do PI-1. Dessa forma, considerando o período de monitoramento na primeira estação (Av. Amazonas), foram observados 33 dias (16,2%) e 53 dias (26,0%) em que os padrões PI-1 e PF foram ultrapassados, respectivamente, o que ocorreu entre março e maio de 2019.

Sobre o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), foram observadas baixas concentrações do poluente durante todo o ano, sendo que os maiores valores foram atingidos em junho e julho, podendo estar associada de alguma forma a queimadas, visto que a literatura indica uma maior emissão no período do outono associada à degradação da clorofila. Dessa forma, a concentração do poluente esteve bem abaixo do PF estabelecido, em ambas as estações.

Dessa forma, as diferenças nos valores de concentração dos poluentes ao longo do ano, com a observação de picos bem nítidos em alguns deles, permitiu constatar o efeito da sazonalidade, pelo que se identificou forte influência sobretudo das estações secas.

Com relação à avaliação quanto ao comportamento horário, ou seja, ao longo do dia, observou-se maiores concentrações de materiais particulados em horários coincidentes com maior fluxo de veículos, com destaque para o período matutino. Além disso, foi possível verificar um comportamento semelhante na variação dos poluentes  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  ao longo do dia, sobretudo na Avenida Amazonas, com alguns picos do primeiro entre 08hrs30min e 09hrs30min e do segundo por volta do meio-dia. Por fim, na mesma estação, o comportamento da variação do ozônio em relação à radiação solar foi visível.

Com relação à estatística univariada, foram constatadas correlações fortes entre os poluentes  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  nas duas estações de monitoramento, associado ao fato de que ambos são oriundos dos processos de queima; e do  $O_3$  com a temperatura e radiação solar na estação da Avenida do Contorno, onde os dados para esse poluente foram completos, confirmando o comportamento verificado na variação horária. Também, observou-se uma correlação do tipo inversa, apesar de fraca, entre precipitação e umidade relativa com os materiais particulados. Quanto a isso, convém destacar que a Correlação de Pearson busca relações somente do tipo linear. Supõe-se que com a análise de mais dados, englobando outros anos, essa correlação pode se apresentar mais forte.

Por fim, com relação ao uso da estatística multivariada, com as análises de agrupamento hierárquico e de componentes principais, é possível dizer que elas foram satisfatórias na medida que permitiram avaliar as relações existentes entre as variáveis de estudo, complementando a visão que uma simples avaliação de distribuição dos dados não é capaz de trazer. Dessa forma, o uso da metodologia trouxe confirmações e complementariedade à discussão, por meio do levantamento de hipóteses a respeito das relações existentes dos poluentes entre si e deles com os parâmetros meteorológicos. Cabe destacar o agrupamento formado pelos materiais particulados e o monóxido de carbono, os quais foram reunidos por sua similaridade quanto à origem: a combustão. Além disso, as análises mostraram a relação da umidade relativa e precipitação com estes três poluentes, pelo que se levantou a hipótese da deposição úmida. Por último, outro agrupamento significativo foi do poluente ozônio com temperatura e radiação solar, corroborando as demais análises feitas anteriormente.

## 7 REFERÊNCIAS

ALVES, Célia. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**, [S.L.], p. 859-870, v. 28, n.5, 2005, Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500025>.

BAIRD, Colin & CANN, Michael. **Química Ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.

BRAGA, Benedito. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 332 p.

BRAGA, André Luis; SICILIANO, Bruno; DANTAS, Guilherme; ANDRÉ, Michelle; SILVA, Cleyton Martins da; ARBILLA, Graciela. Levels of Volatile Carbonyl Compounds in the Atlantic Rainforest, in the City of Rio de Janeiro. **Bulletin of Environmental Contamination And Toxicology**, [S.L.], v. 102, n. 6, p. 757-762, 13 abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00128-019-02615-z>.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. **Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 6148**. Procuradoria Geral da República. Relator: Ministra Carmem Lúcia. Ofício Procuradoria Regional da República - 3ª Região. Brasília, 2019. Disponível em: <https://mpfdrive.mpf.mp.br/ssf/s/readFile/share/153417/1892253431850910350/publicLink/A DI%206148%20-%20Representa%C3%A7%C3%A3o%20PRR3%20e%20Anexos.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

BUCCO, Magali Vieira Santiago. **Construção e Testes de Validação de Amostradores Passivos para Dióxido de Nitrogênio e Ozônio**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Publicada no DOU nº 1, de 2 de janeiro de 2007, Seção 1, p. 131-137. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>. Acesso em: 19 out. 2020.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990 (revogada). Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília, DF, 1990.

CONAMA. Resolução nº 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar - PRONAR, DF, 1989.

CONAMA. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília, DF, 2018.

CÓNSUL, Julia María Díaz et al. Decomposição Catalítica De Óxidos De Nitrogênio. **Química Nova**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 432-440, 2004.

CORRÊA, Sergio Machado; ARBILLA, Graciela; MARTINS, Eduardo Monteiro; QUITÉRIO, Simone Lorena; GUIMARÃES, Claudinei de Souza; GATTI, Luciana Vanni. Five years of

formaldehyde and acetaldehyde monitoring in the Rio de Janeiro downtown area – Brazil. **Atmospheric Environment**, [S.L.], v. 44, n. 19, p. 2302-2308, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.043>.

DANTAS, Guilherme; SICILIANO, Bruno; FREITAS, Letícia; SEIXAS, Eduardo Guedes de; SILVA, Cleyton M. da; ARBILLA, Graciela. Why did ozone levels remain high in Rio de Janeiro during the Brazilian truck driver strike? **Atmospheric Pollution Research**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 2018-2029, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.010>. Acesso em: 26 out. 2020.

FAJERSZTAJN, Laís; VERAS, Mariana; BARROZO, Ligia Vizeu; SALDIVA, Paulo. Air pollution: a potentially modifiable risk factor for lung cancer. **Nature Reviews Cancer**, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 674-678, 8 ago. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nrc3572>.

FEAM - Fundação Estadual Do Meio Ambiente. **Monitoramento da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte Ano Base de 2013**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2016. 77 p. Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/2016/QUALIDADE\\_AR/Rel\\_05\\_monitoramento\\_qualidade\\_ar\\_RMBH\\_2013\\_REV\\_vers%C3%A3o\\_final\\_1.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2016/QUALIDADE_AR/Rel_05_monitoramento_qualidade_ar_RMBH_2013_REV_vers%C3%A3o_final_1.pdf). Acesso em: 11 abr. 2021.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Orientações para implementação e operação de programa de monitoramento automático da qualidade do ar**. Belo Horizonte: S.I., 2011. 11 p. Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/2019/QUALIDADE\\_AR/NOTA\\_T%C3%89CNICA\\_01.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2019/QUALIDADE_AR/NOTA_T%C3%89CNICA_01.pdf). Acesso em: 03 nov. 2020.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Qualidade do Ar**. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/qualidade-do-ar>. Acesso em: 03 nov. 2020.

FERREIRA, Marta Leite. **O mistério do nevoeiro mortífero de Londres foi resolvido. Matou 4 mil pessoas**. 2016. Disponível em: <https://observador.pt/2016/11/17/o-misterio-do-nevoeiro-mortifero-de-londres-foi-resolvido/>. Acesso em: 19 set. 2020.

GREENSTONE, Michael; FAN, Claire. **Air Quality Life Index® | July 2020**. Chicago: Energy Policy Institute At The University Of Chicago (Epic), 2020. 12 p.

GUERRA, F.P.; MIRANDA, R.M. (2011) **Influência da meteorologia na concentração do poluente atmosférico PM<sub>2,5</sub> na RMRJ e na RMSP**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2. Anais.

GUIMARÃES, Paulo Ricardo Bittencourt. **Estudo sobre as relações entre as doenças respiratórias e a poluição atmosférica, variáveis climáticas e áreas verdes, na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil**. 2011. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba,

2011. Disponível em: [http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf\\_dr/2011/t304\\_0159-D.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_dr/2011/t304_0159-D.pdf). Acesso em: 19 set. 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**: Belo horizonte. Belo Horizonte. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-horizonte.html>. [entre 2000 e 2010]. Acesso em: 03 nov. 2020.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (org.). **Weather information for the Olympic and Paralympic Games in Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: S.I., 2015. 44 p.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos**: belo horizonte. Belo Horizonte, [2020?]. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>. Acesso em: 03 nov. 2020.

INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE. **Avaliação da Resolução 491/2018 Quanto À Sua Efetividade Para Proteção da Saúde os Sobre Os Mecanismos de Informação à Sociedade**. São Paulo: S.I., 2019. Disponível em: <https://www.saudeesustentabilidade.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Avaliacao-491.18-rev3final.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

LEITE, Renata Carvalho Macedo et al. Utilização de regressão logística simples na verificação da qualidade do ar atmosférico de Uberlândia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 175-180, jan. 2011.

LIMA, Yara da Luz *et al.* Poluição atmosférica e clima: refletindo sobre os padrões de qualidade do ar no brasil. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, n. 5, p. 555-564, 2012.

LISBOA, Henrique de Melo. Controle da Poluição Atmosférica. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

LYRA, Gustavo Bastos; ODA-SOUZA, Melissa; VIOLA, Denise Nunes. Modelos lineares aplicados à estimativa da concentração do material particulado (PM10) na cidade do Rio de Janeiro, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, S.I., p. 392-700, set. 2011.

MANAHAN, S. E. **Química ambiental**. 9.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 912 p.

MINGOTI, Sueli Aparecida. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297p.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Qualidade do Ar**, [2020?]. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html>. Acesso em: 04 nov. 2020.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar**. Brasília: Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos, 2019. 136 p. Disponível em: [https://www.mma.gov.br/images/agenda\\_ambiental/qualidade-do-ar/Guia\\_Tecnico\\_para\\_o\\_Monitoramento\\_e\\_Avaliacao\\_da\\_Qualidade\\_do\\_Ar.pdf](https://www.mma.gov.br/images/agenda_ambiental/qualidade-do-ar/Guia_Tecnico_para_o_Monitoramento_e_Avaliacao_da_Qualidade_do_Ar.pdf). Acesso em: 08 nov. 2020.

MORAES, Amilton Cravo. **Um modelo para dispersão de poluentes na camada limite planetária com coeficientes de difusão dependentes da distância da fonte**. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

MORTES causadas pela poluição do ar aumentam 14% em 10 anos, aponta ministério da Saúde. G1, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/06/07/mortes-causadas-pela-poluicao-aumentam-14percent-em-10-anos-aponta-ministerio-da-saude.ghtml>. Acesso em: 26 set. 2020.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **ONU: 9 em cada 10 pessoas no mundo respiram ar poluído**. 2018. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/onu-9-em-cada-10-pessoas-no-mundo-respiram-ar-poluido/>. Acesso em: 19 set. 2020.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution**. Washington, DC: The National Academies Press. S.I., 1991. Cap. 6. p. 163-186. Disponível em: <https://www.nap.edu/read/1889/chapter/8>. Acesso em: 26 out. 2020.

NICODEMOS, R. M.; ASSIS, A. J. de; BARROZO, M. A. S. Estudo Sobre Qualidade do Ar na Cidade de Uberlândia: Análise da Influência de Variáveis. **Horizonte Científico** (Uberlândia), v. 2, p. 1-25, 2010.

PINHEIRO, D. K. **Estudo do comportamento do dióxido de nitrogênio atmosférico com base em dados do espectrofotômetro Brewer**./ D. K. Pinheiro. – São José dos Campos: INPE,2003.

PINHEIRO, Samya de Lara Lins de Araujo et al. Isolated and synergistic effects of PM10 and average temperature on cardiovascular and respiratory mortality. **Revista de Saúde Pública**, [S.L.], v. 48, n. 6, p. 881-888, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-8910.2014048005218>.

SANTANA, Eduardo et al. Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012. 81 p.

SANTOS, Fábio Soares dos; PINTO, Janaina Antonino; MACIEL, Felipe Marinho; HORTA, Frederico Silva; ALBUQUERQUE, Taciana Toledo de Almeida; ANDRADE, Maria de Fátima. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP2,5) em Belo Horizonte, MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 371-381, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019174045>.

SANTOS, Tailine Corrêa; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto; REBOITA, Michelle Simões. Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 307-313, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016139269>.

SICILIANO, Bruno; DANTAS, Guilherme; SILVA, Cleyton da; ARBILLA, Graciela. The Updated Brazilian National Air Quality Standards: a critical review. **Journal of The Brazilian**

**Chemical Society**, [S.L.], p. 523-535, 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20190212>.

SILVA, Alexandre Fernando da; VIEIRA, Carlos Alexandre. Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. **Ciência e Sustentabilidade - Ces**, Juazeiro do Norte, v. 3, n. 1, p. 166-189, jan-jun/2017. Semestral. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Aspectos-da-polui%C3%A7%C3%A3o-atmosf%C3%A9rica%3A-uma-reflex%C3%A3o-a-do-Silva-Vieira/7f7fa8b86ab01e8cd101b8d0d5b1b058c9663f2f?p2df>. Acesso em: 19 set. 2020.

SILVA, C. M et al. Speciation Analysis of Ozone Precursor Volatile Organic Compounds in the Air Basins of the Rio de Janeiro Metropolitan Area. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 1887-1909, 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170111>.

SILVA, Cleyton; SICILIANO, Bruno; CARVALHO, Nicole; CORRÊA, Sergio; ARBILLA, Graciela. Modelos fotoquímicos simples como ferramenta para o gerenciamento da qualidade do ar. **Química Nova**, [S.L.], p. 273-282, 2019. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170343>.

SILVA, Mauricio Soares da. **Investigação dos Processos Fonte-Sumidouro do Ozônio Troposférico na RMRJ: Abordagem Teórica e Computacional**. 2019. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, Luciana Almeida; ANDRADE, Jailson B. de; LOPES, Wilson A.; CARVALHO, Luiz S.; PEREIRA, Pedro A. P. **Solubilidade e reatividade de gases**. Química Nova, [S.L.], p. 824-832, 24 mar. 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170034>.

SILVA, Michele André da. **Estudo das concentrações de compostos orgânicos voláteis na cidade de Nilópolis e no parque natural do Gericinó, Rio de Janeiro, Brasil**. 2019. 266 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

THOMAS, Jennifer Ann. **Cidades poluídas têm maior índice de óbitos por Covid-19, mostra estudo**. VEJA. 2020. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/ciencia/cidades-poluidas-tem-maior-indice-de-obitos-por-covid-19-mostra-estudo/>. Acesso em: 26 set. 2020.

TURBIANI, Renata. **O segundo maior perigo global à saúde humana (depois da covid-19) que encurta nossa vida em quase 2 anos**. BBC News Brasil. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-53782795>. Acesso em: 26 set. 2020.

VALLADARES NETO, José et al. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontol Bras Central**, S.I., v. 76, n. 26, p. 1-6, 2017.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Análise de Componentes Principais**. Curso de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Seropédica, RJ, 2008.

VICINI, Lorena. **Análise Multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Monografia (Especialização) - Curso de Estatística e Modelagem Quantitativa, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

WIKIPEDIA. **Nitrite**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrite>. Acesso em: 11 abr. 2021.

WIKIPEDIA. **Dióxido de enxofre**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido\\_de\\_enxofre](https://pt.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_enxofre). Acesso em: 11 abr. 2021.

WIKIPEDIA. **Ozone**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>. Acesso em: 11 abr. 2021.

WHO (Copenhagen). ONU. **Air quality guidelines global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. 2006. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>. Acesso em: 19 set. 2020.

WHO. **Air quality guidelines – global update 2005**. Disponível em: [https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/\[2005?\]](https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/[2005?]). Acesso em: 04 nov. 2020.

WHO. **Air quality guidelines for Europe**. WHO regional publications – European series, n. 91. Copenhagen: WHO, 2000. Disponível em: <https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/air-quality-guidelines-for-europe>. Acesso em: 04 nov. 2020.

World Bank; IHME - Institute for Health Metrics and Evaluation. **The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action**. World Bank, Washington, DC. © World Bank, 2016. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25013>. Acesso em: 19 set. 2020.

WU, Xiao; NETHERY, Rachel C.; SABATH, M. Benjamin; BRAUN, Danielle; DOMINICI, Francesca. **Exposure to air pollution and covid-19 mortality in the United States: a nationwide cross-sectional study**. MedRxiv, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>.