



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



VINÍCIUS MELO DUARTE

**ESTUDO DA QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO DE
UBERLÂNDIA-MG NO CONTEXTO DA PANDEMIA DE COVID-19**

UBERLÂNDIA - MG

2021

VINÍCIUS MELO DUARTE

**ESTUDO DA QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO DE
UBERLÂNDIA-MG NO CONTEXTO DA PANDEMIA DE COVID-19**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Linha de pesquisa: Sistemas Particulados.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo.

Co-orientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima.

UBERLÂNDIA - MG

2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

D812 Duarte, Vinícius Melo, 1979-

2021 Estudo da Qualidade do Ar Atmosférico de Uberlândia-MG no Contexto da Pandemia de Covid-19 [recurso eletrônico]
/ Vinícius Melo Duarte. - 2021.

Orientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo.

Coorientador: Euclides Antônio Pereira de Lima.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.661>

Inclui bibliografia.

I. Engenharia química. I. Barrozo, Marcos Antônio de Souza, 1961-, (Orient.). II. Lima, Euclides Antônio Pereira de, 1964-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 18/2021, PPGEQ				
Data:	08 de dezembro de 2021	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:40
Matrícula do Discente:	12012EQU011				
Nome do Discente:	Vinícius Melo Duarte				
Título do Trabalho:	Estudo da qualidade do ar atmosférico de Uberlândia-MG no contexto da pandemia de COVID-19				
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo da qualidade do ar da cidade de Uberlândia				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Taisa Shimosakai de Lira - CEUNES/UFES; Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU; Euclides Antônio Pereira de Lima - UNIUBE/Campus Uberlândia, coorientador e Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/12/2021, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

DEDICATÓRIA

Dedico essa obra à minha família – base sólida sobre a qual fui capaz de construir quem sou – e a todos os educadores que contribuíram para a minha formação como profissional e como indivíduo.

A meus pais, Élio e Betinha, que nunca pouparam esforços para investir na educação minha e de meus irmãos. Tornaram-se professores doutores antes de qualquer outra pessoa que eu conhecesse. Dedicaram a vida a ensinar e a formar novos profissionais. Para mim sempre foram modelos de integridade e honestidade. E hoje se dedicam a aproveitar a aposentadoria mimando os netos, merecidamente.

A meus irmãos, Luciano, Juliana e Marina, cada um com suas qualidades e virtudes únicas. Vivenciamos e aprendemos tanta coisa juntos que não conseguiria citar nem a metade. E a seus cônjuges e filhos, meus lindos sobrinhos, que vieram complementar a família de forma tão alegre.

A minha esposa, Tâmara, companheira de todos os dias, amor da minha vida, minha melhor amiga. Profissional competente e dedicada, não mede esforços para prover o bem-estar de crianças enfermas, sempre buscando se aprimorar como médica e como pessoa. Mãe amorosa de nossos filhos Gustavo, Murilo e Ana Liz, que completam a felicidade do nosso dia a dia. E a todos seus familiares, que há décadas se tornaram também a minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia;

Ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Uberaba;

Aos órgãos de fomento e pesquisa: CNPq, CAPES, FAPEMIG;

Aos alunos de graduação da Engenharia Ambiental da UFU: João Victor Delfino Silva e Lucas Marcelo Pereira Cruvinel; e da Engenharia Ambiental da UNIUBE: Gustavo Henrique Silvano Duarte;

Aos integrantes da banca: Prof.^a Dr.^a Taisa Lira e Prof. Dr. Cláudio Duarte;

A meus orientadores da pesquisa: Prof. Dr. Marcos Barrozo e Prof. Dr. Euclides Lima.

RESUMO

Uberlândia é o município mais populoso do interior de MG e o quarto do interior do Brasil, com uma população de 706.597 pessoas em 2021 e uma frota de 0,693 veículo/habitante, bem acima da média nacional, fator que impacta diretamente a qualidade do ar atmosférico da região. Os anos de 2020 e 2021 foram atípicos devido à pandemia provocada pelo coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2 (SARS-CoV-2). A redução forçada da circulação de veículos em todo o planeta ocasionou uma melhora momentânea na qualidade do ar atmosférico. O objetivo do trabalho foi estudar a qualidade do ar de Uberlândia no período em que o município passou por restrições temporárias devido à pandemia, medindo-se a concentração de três dos poluentes abarcados pela Resolução Conama nº 491/2018: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP_{10}) e Ozônio (O_3). As análises estatísticas foram realizadas por meio do uso de gráficos do tipo *box plot* e por coeficientes de correlação. Durante o período de restrições mais intensas, a concentração de PTS ficou, em média, 21,2% abaixo dos respectivos meses na comparação com o registro histórico de 2003 a 2018. Quanto ao MP_{10} , a melhoria da qualidade do ar foi de 58,1%. No entanto, após a flexibilização das restrições, a qualidade do ar atmosférico voltou a piorar. Do inverno de 2020 (período de fortes restrições) para o inverno de 2021 (após a flexibilização das restrições), o aumento médio da concentração de PTS no ar atmosférico foi de 41,5%, enquanto o aumento para o MP_{10} foi de 39,1%. Durante o período do estudo, a qualidade do ar foi considerada boa em 100% das medições referentes às médias diárias de PTS; em 96,4% das médias diárias de MP_{10} e em 98,2% das médias horárias de ozônio. Com relação à pandemia de Covid-19, a análise de dados mostrou que o número de novos casos diários da doença contribuiu para que as pessoas ficassem em casa, melhorando a qualidade do ar atmosférico, o que sugere que a redução na poluição é uma questão de conscientização das pessoas.

Palavras-chave: Qualidade do ar; PTS; MP_{10} ; Ozônio; Pandemia.

ABSTRACT

Uberlândia-MG is the largest city in the interior of the state and the fourth in the interior of Brazil, with a population of 706,597 in 2021, and a fleet of 0.693 vehicle/inhabitant, way above the national average, a factor that directly impacts the region's atmospheric air quality. The years 2020 and 2021 were atypical due to the pandemic caused by the severe acute respiratory syndrome 2 coronavirus (SARS-CoV-2). The forced reduction in the circulation of vehicles across the planet caused a momentary improvement in the quality of atmospheric air. The objective of the work was to study the air quality of Uberlândia during the period in which the city underwent temporary restrictions due to the pandemic, by measuring the concentration of three of the pollutants covered by Conama Resolution 491/2018: Total Suspended Particles (TSP), Inhalable Particles (PM₁₀) and Ozone (O₃). Statistical analyzes were performed using box plot graphs and correlation coefficients. During the period of more intense restrictions, the concentration of TSP was, on average, 21.2% below the respective months compared to the historical record from 2003 to 2018. As for PM₁₀, the improvement in air quality was 58.1%. However, after the relaxation of restrictions, atmospheric air quality deteriorated again. From winter 2020 (period of strong restrictions) to winter 2021 (after the relaxation of restrictions), the average increase in the concentration of TSP in atmospheric air was 41.5%, while the increase for PM₁₀ was 39.1%. During the study period, air quality was considered good in 100% of the measurements referring to the daily averages of TSP; in 96.4% of the daily averages of PM₁₀ and in 98.2% of the hourly averages of ozone. Regarding the Covid-19 pandemic, data analysis showed that the number of new daily cases of the disease contributed to people staying at home, improving atmospheric air quality, which suggested that reducing pollution is an issue of people's awareness.

Keywords: Air quality; TSP; PM₁₀; Ozone; Pandemic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - População, frota veicular e média de veículos por habitante em Uberlândia-MG.....	2
Figura 2 - Representação das camadas da atmosfera terrestre e das variações de temperatura e pressão com a altitude.....	5
Figura 3 - Representação do fenômeno de inversão térmica.....	6
Figura 4 - Linha do tempo de algumas das pesquisas, no campo da Engenharia Química, relacionadas ao ar atmosférico em Uberlândia-MG.....	13
Figura 5 - Concentração diária de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2006.....	13
Figura 6 - Concentração diária de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2006.....	14
Figura 7 - Média mensal de concentração de PTS e de precipitação em Uberlândia-MG entre 2003 e 2006.....	15
Figura 8 - Rosa dos ventos em Uberlândia-MG no período de 2003 a 2006, representando a direção e intensidade médias.....	15
Figura 9 - Concentrações diárias de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2012.....	16
Figura 10 - Influência da precipitação pluviométrica nos níveis de MP ₁₀ em Uberlândia-MG.	17
Figura 11 - Influência da umidade relativa do ar nos níveis de MP ₁₀ em Uberlândia-MG.....	17
Figura 12 - Comparação da concentração de MP ₁₀ em Uberlândia-MG nos períodos seco e úmido com a legislação vigente.....	18
Figura 13 - Concentração média anual de PTS em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.....	18
Figura 14 - Relação entre o índice pluviométrico e a concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.....	19
Figura 15 - Concentração média anual de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.....	20
Figura 16 - Relação entre o índice pluviométrico e a concentração de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.....	20
Figura 17 - Concentração de NO ₂ troposférico na China antes e durante o período de <i>lockdown</i>	21
Figura 18 - Concentração de aerossol na Índia antes e durante o período de <i>lockdown</i>	22
Figura 19 - Novos casos diários de coronavírus registrados no Brasil (média móvel de 7 dias).	23
Figura 20 - Localização das estações de qualidade do ar e meteorológica de Uberlândia-MG.	25

Figura 21 - Amostradores de grandes volumes (AGV) para partículas totais em suspensão (PTS) e partículas inaláveis (MP ₁₀) instalados em Uberlândia-MG.....	26
Figura 22 - Esquema interno do AGV-PTS.....	27
Figura 23 - Acessórios do AGV: horômetro (esq.) e registrador de eventos.....	28
Figura 24 - Esquema interno do AGV-MP10.....	29
Figura 25 - Esquema interno da cabeça de separação do AGV-MP10.....	30
Figura 26 - Filtros novos instalados nos amostradores de grandes volumes.....	32
Figura 27 - Exemplo de carta gráfica usada em uma medição.....	33
Figura 28 - Estufa utilizada para regeneração de sílica gel.....	34
Figura 29 - Caixa de madeira utilizada para secagem dos filtros.....	35
Figura 30 - Balança utilizada para pesagem dos filtros.....	35
Figura 31 - Processo de calibração dos amostradores de grandes volumes.....	39
Figura 32 - Medidor de ozônio Aeroqual, série 200.....	40
Figura 33 - Medidor de ozônio apoiado em tripé durante amostragem.....	41
Figura 34 - Exemplo de diagrama <i>box plot</i> típico.....	43
Figura 35 - Tipos de associações entre duas variáveis.....	45
Figura 36 - Exemplo de dados meteorológicos de Uberlândia-MG disponibilizados no servidor do Inmet.....	46
Figura 37 - Período de funcionamento da estação meteorológica de Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	50
Figura 38 - Perfil de precipitação de chuva total mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	51
Figura 39 - Perfil de umidade relativa do ar média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	52
Figura 40 - Perfil de temperatura do ar média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	53
Figura 41 - Perfil de pressão atmosférica média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	53
Figura 42 - Perfil de velocidade do vento média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	54
Figura 43 - Perfil de radiação solar média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.....	55
Figura 44 - Médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018.....	56

Figura 45 - Gráfico <i>box plot</i> das médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018.....	57
Figura 46 - Gráfico <i>box plot</i> das médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018, após a exclusão dos <i>outliers</i>	57
Figura 47 - Concentração média diária de PTS em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021, em comparação com o Padrão Final definido na Resolução Conama nº 491/2018.....	58
Figura 48 - Concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021.....	59
Figura 49 - Gráfico <i>box plot</i> de concentração de PTS por estação do ano.....	59
Figura 50 - Comparação das concentrações médias de PTS medidas em 2020 e 2021 com as médias históricas de 2003 a 2018.....	60
Figura 51 - Concentração média mensal de PTS do período analisado (2020 e 2021) em relação à média mensal histórica (2003 a 2018).....	61
Figura 52 - Concentração média anual de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021, em comparação com o Padrão Final definido na Resolução Conama nº 491/2018.....	63
Figura 53 - Gráfico comparativo entre valores históricos de umidade relativa do ar, entre 2003 e 2021, e concentração de PTS no ar atmosférico em Uberlândia-MG.....	64
Figura 54 - Comparação entre o número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil com a concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG.....	65
Figura 55 - Médias mensais de concentração de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017.	67
Figura 56 - Gráfico <i>box plot</i> das médias mensais de concentração de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017.....	67
Figura 57 - Gráfico <i>box plot</i> das médias mensais de concentração de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017, após a exclusão dos <i>outliers</i>	68
Figura 58 - Concentração média diária de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021, em comparação com os Padrões Intermediários 1, 2 e 3 e com o Padrão Final definidos na Resolução Conama nº 491/2018.....	69
Figura 59 - Concentração média mensal de MP ₁₀ em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021.....	69
Figura 60 - Gráfico <i>box plot</i> de concentração de MP ₁₀ por estação do ano.....	70
Figura 61 - Comparação das concentrações médias de MP ₁₀ medidas em 2020 e 2021 com as médias históricas de 2003 a 2017.....	71
Figura 62 - Concentração média mensal de MP ₁₀ do período analisado (2020 e 2021) em relação à média mensal histórica (2003 a 2017).....	71

Figura 63 - Concentração média anual de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021, em comparação com os Padrões Intermediários 1, 2 e 3 e com o Padrão Final definidos na Resolução Conama nº 491/2018.....	73
Figura 64 - Gráfico comparativo entre valores históricos de umidade relativa do ar, entre 2003 e 2021, e concentração de MP_{10} no ar atmosférico em Uberlândia-MG.....	75
Figura 65 - Comparação entre o número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil com a concentração média mensal de MP_{10} em Uberlândia-MG.....	76
Figura 66 - Resultados de medições preliminares de concentração de ozônio média horária (esq.) e mensal em Uberlândia-MG entre outubro e dezembro/2017.....	77
Figura 67 - Resultados de medições preliminares de concentração de ozônio média horária (esq.) e mensal em Uberlândia-MG entre setembro/2019 e janeiro/2020.....	78
Figura 68 - Concentração média horária de ozônio em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021, em comparação com os Padrões Intermediários 1, 2 e 3 e com o Padrão Final definidos na Resolução Conama nº 491/2018 para média de 8 horas.....	79
Figura 69 - Concentração média mensal de ozônio em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021....	79
Figura 70 - Gráfico <i>box plot</i> de concentração de ozônio por estação do ano.....	80
Figura 71 - Gráfico comparativo entre valores históricos de velocidade do vento e concentração de ozônio no ar atmosférico em Uberlândia-MG.....	81
Figura 72 - Gráfico comparativo entre valores históricos de umidade relativa do ar (2003-2021) e concentração média de ozônio no ar atmosférico em Uberlândia-MG.....	82
Figura 73 - Comparação entre o número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil com a concentração média mensal de ozônio em Uberlândia-MG.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites estabelecidos na Resolução Conama nº 003/1990 (revogada).....	10
Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar estabelecidos na Res. Conama nº 491/2018 (em vigor).	12
Tabela 3 - Médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	62
Tabela 4 - Coeficientes de correlação entre a concentração de PTS e variáveis atmosféricas.	64
Tabela 5 - Médias mensais de concentração de MP10 em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	72
Tabela 6 - Coeficientes de correlação entre a concentração de MP10 e variáveis atmosféricas.	74
Tabela 7 - Médias mensais de concentração de ozônio em Uberlândia-MG entre 2017 e 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	80
Tabela 8 - Coeficientes de correlação entre a concentração de ozônio e variáveis atmosféricas.	81
Tabela 9 - Número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil de março a dezembro/2020.	94
Tabela 10 - Número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil de janeiro a setembro/2020.	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais dados técnicos do AGV-PTS.....	28
Quadro 2 - Principais dados técnicos do AGV-MP10.....	30
Quadro 3 - Principais características dos filtros de fibra de vidro.....	31
Quadro 4 - Principais características da balança de precisão HR-120.....	36
Quadro 5 - Principais características do medidor de ozônio portátil Aeroqual, série 200.....	41
Quadro 6 - Referência para interpretação do coeficiente de correlação.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV – Amostrador de grandes volumes

Cetesb – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente

Covid-19 – Doença do coronavírus (ano 2019)

CSV – *Comma separated values* (valores separados por vírgula)

CVV – Controlador volumétrico de vazão

EPA – *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana)

ESA – *European Space Agency* (Agência Espacial Europeia)

ESPI – Emergência de saúde pública internacional

GSS – *Gas sensitive semiconductor* (semicondutor sensível a gás)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IQAR – Índice de qualidade do ar

MP – Material particulado

MP₁₀ – Partículas inaláveis

MP_{2,5} – Partículas inaláveis finas

NASA – *North American Space Agency* (Agência Espacial Norte-Americana)

NO₂ – Dióxido de nitrogênio

NO_x – Óxidos de nitrogênio

O – Oxigênio atômico

O₂ – Oxigênio molecular

O₃ – Ozônio

OMS – Organização Mundial de Saúde

Pb – Chumbo

PF – Padrão de qualidade do ar final

PI-1 – Padrão de qualidade do ar intermediário I

PI-2 – Padrão de qualidade do ar intermediário II

PI-3 – Padrão de qualidade do ar intermediário III

ppm – Partes por milhão

PTS – Partículas totais em suspensão

SARS-CoV-2 – Coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2

Sisnama – Sistema Nacional do Meio Ambiente

SO₂ – Dióxido de enxofre

VOC – *Volatile organic compounds* (Compostos orgânicos voláteis)

SUMÁRIO

RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE QUADROS	xx
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxi
SUMÁRIO	xxiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA.....	4
2.2 POLUENTES DE INTERESSE.....	7
2.3 RESOLUÇÕES DO CONAMA.....	9
2.3.1 Resolução Conama nº 003/1990 (revogada).....	9
2.3.2 Resolução Conama nº 005/1989 (revogada em partes).....	11
2.3.3 Resolução Conama nº 491/2018 (em vigor).....	11
2.4 QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO DE UBERLÂNDIA-MG.....	12
2.5 PANDEMIA DE COVID-19.....	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 AMOSTRADOR DE GRANDES VOLUMES DE PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO (AGV-PTS).....	27
3.2 AMOSTRADOR DE GRANDES VOLUMES DE PARTÍCULAS INALÁVEIS (AGV- MP10).....	29
3.3 MATERIAL DE CONSUMO.....	31
3.3.1 Filtro de fibra de vidro.....	31
3.3.2 Carta gráfica.....	32
3.4 EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO.....	33
3.4.1 Estufa para secagem.....	33
3.4.2 Caixa de secagem.....	34

3.4.3 Balança de precisão.....	35
3.5 OPERAÇÃO DE AMOSTRAGEM DE PTS E MP ₁₀	36
3.6 CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE PTS E MP ₁₀	37
3.7 MEDIDOR DE OZÔNIO.....	40
3.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	42
3.8.1 Diagrama <i>Box Plot</i>	42
3.8.2 Correlação.....	44
3.8.3 Dados atmosféricos.....	45
3.8.4 Concentração dos poluentes.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 DADOS METEOROLÓGICOS DE UBERLÂNDIA-MG.....	49
4.1.1 Período de operação da estação meteorológica.....	50
4.1.2 Precipitação de chuva.....	50
4.1.3 Umidade relativa do ar.....	51
4.1.4 Temperatura do ar.....	52
4.1.5 Pressão atmosférica.....	53
4.1.6 Velocidade do vento.....	54
4.1.7 Radiação solar.....	55
4.2 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO (PTS).....	56
4.2.1 Valores históricos de médias mensais de PTS.....	56
4.2.2 Medições realizadas de PTS.....	58
4.2.3 Comparação das médias mensais de PTS com o registro histórico.....	60
4.2.4 Comparação das médias anuais de PTS com o registro histórico.....	62
4.2.5 Correlação das médias mensais de PTS com variáveis atmosféricas.....	63
4.2.6 Comparação das médias mensais de PTS com períodos da pandemia de Covid-19	65
4.3 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS INALÁVEIS (MP ₁₀).....	66
4.3.1 Valores históricos de médias mensais de MP ₁₀	66
4.3.2 Medições realizadas de MP ₁₀	68
4.3.3 Comparação das médias mensais de MP ₁₀ com o registro histórico.....	70
4.3.4 Comparação das médias anuais de MP ₁₀ com o registro histórico.....	73
4.3.5 Correlação das médias mensais de MP ₁₀ com variáveis atmosféricas.....	74
4.3.6 Comparação das médias mensais de MP ₁₀ com períodos da pandemia de Covid-19.....	76

4.4 CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO (O ₃).....	77
4.4.1 Medições preliminares de ozônio.....	77
4.4.2 Medições efetivas de ozônio.....	78
4.4.3 Correlação das médias mensais de ozônio com variáveis atmosféricas.....	81
4.4.4 Comparação das médias mensais de ozônio com períodos da pandemia de Covid-19.....	82
5 CONCLUSÕES.....	84
5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	88
6 REFERÊNCIAS.....	89
7 ANEXO	93

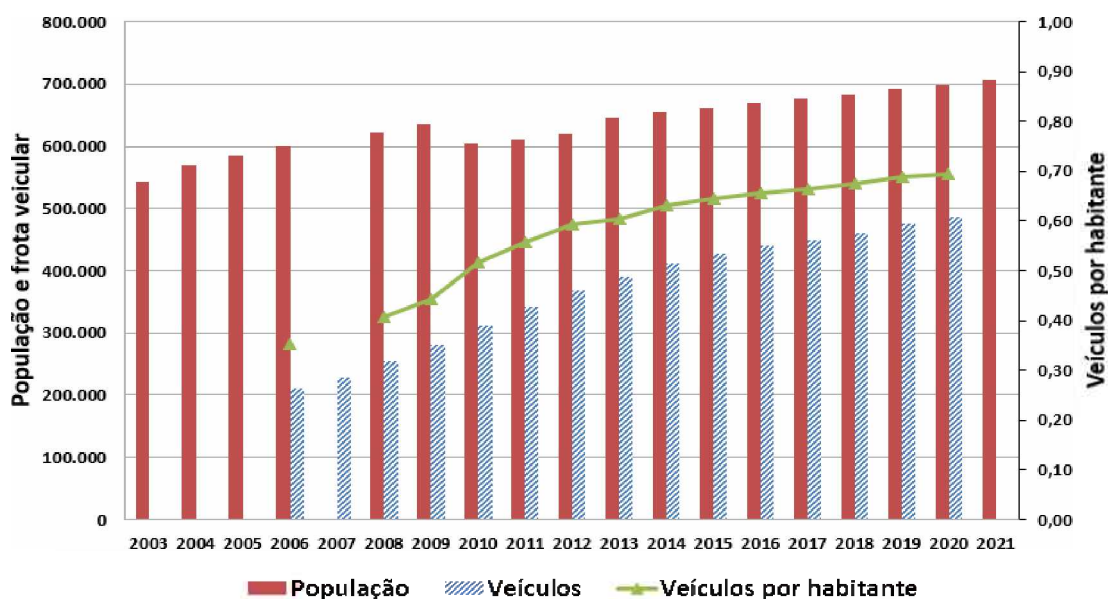
Situado no estado de Minas Gerais, na Região Sudeste do país, Uberlândia é o município mais populoso do interior do estado e o quarto do interior do Brasil. Segundo o IBGE (2021), sua população contabilizada no último censo, em 2010, era de 604.013 pessoas, com uma densidade demográfica de 146,78 habitantes por quilômetro quadrado. A população estimada em julho de 2020 era de 699.097 pessoas, o que representa um aumento de 15,7% na população em 10 anos. A frota de veículos do município em 2010 foi estimada pelo IBGE em 311.127 veículos. Em 2020, esse número passou para 485.472 veículos em circulação no município, o que representa um aumento de 56% na frota veicular no mesmo período de 10 anos (Fig. 1).

Conforme os dados disponíveis, a relação de veículos por habitantes, ano após ano, está em crescimento constante em Uberlândia-MG. Enquanto em 2010 havia aproximadamente um veículo em circulação para cada dois habitantes (0,524 veículo/habitante), em 2020, para cada três habitantes, havia em média dois veículos em uso (0,693 veículo/habitante), relação bastante superior à da média nacional, de 0,510 veículo/habitante¹. Sabe-se que o aumento da população e da frota veicular de um município impacta diretamente a qualidade do ar atmosférico, sobretudo nas regiões onde o fluxo de veículos é mais intenso.

O ar atmosférico é, sem dúvida, um dos bens mais preciosos da humanidade. Pode-se dizer que esse é o composto do qual somos mais dependentes para realizar qualquer tipo de atividade, sem sequer nos darmos conta disso.

¹ Segundo o IBGE (2021), a frota brasileira totalizava 107.948.371 veículos para uma população estimada em 211.755.692 pessoas, em 2020.

Figura 1 - População, frota veicular e média de veículos por habitante em Uberlândia-MG.



Fonte: IBGE (2021).

Mas não é só a falta de oxigênio que pode prejudicar os seres vivos, como também a presença de impurezas no ar que respiramos. A Organização Mundial de Saúde (OMS, 2021) estima que 91% da população mundial vive em lugares onde os níveis da qualidade do ar excedem os limites definidos por essa instituição. E que sete milhões de pessoas morrem no mundo por ano em consequência da poluição atmosférica. Entre as múltiplas fontes, incluem-se: indústrias, veículos, geração de energia elétrica, incineração de lixo e resíduos de agricultura, energia residencial para aquecimento e preparo de alimentos etc.

Nesse sentido, a qualidade do ar atmosférico, sobretudo nos grandes centros urbanos, tem sido uma preocupação constante das autoridades de todo o mundo. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente publicou a Resolução Conama nº 491, de 19 de novembro de 2018, a qual dispõe sobre padrões de qualidade do ar (CONAMA, 2018). Essa resolução, bem mais restritiva do que as anteriores, adota como referência os valores-guia de qualidade do ar recomendados pela OMS em 2005.

Em termos de emissões atmosféricas, os anos de 2020 e 2021 foram atípicos. A pandemia provocada pelo coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2 (SARS-CoV-2) alterou substancialmente os padrões da sociedade. O fechamento temporário de estabelecimentos comerciais e de ensino – o que obrigou várias pessoas a trabalharem e estudarem a partir de casa – resultou em uma redução na circulação de veículos em todo o

planeta. Em diversas cidades do mundo foi observada uma melhora momentânea na qualidade do ar atmosférico.

Duarte *et al.* (2021) fizeram um levantamento bibliográfico dos principais efeitos do isolamento social provocado pela pandemia na qualidade do ar em algumas regiões dos continentes asiático, europeu, africano e americano. Constatou-se a redução temporária nos níveis de diversos poluentes atmosféricos, como NO₂, CO₂, CO e material particulado, porém o aumento na concentração de O₃ em certas regiões.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é estudar a qualidade do ar atmosférico de Uberlândia-MG durante o período da pandemia de SARS-CoV-2.

Os objetivos específicos são:

- Quantificar a concentração de Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP₁₀) e Ozônio (O₃) – três dos poluentes abarcados pela Resolução Conama nº 491/2018 – em Uberlândia-MG, durante os meses de abril/2020 a setembro/2021, período em que o município passou por restrições temporárias devido à pandemia de SARS-CoV-2;
- Avaliar os efeitos da pandemia de SARS-CoV-2 na concentração desses poluentes e, conseqüentemente, na qualidade do ar atmosférico do município.

2.1 DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

Segundo Barry e Chorley (2013), a atmosfera pode ser dividida em camadas horizontais, definidas com base, principalmente, na temperatura. A camada inferior, chamada troposfera, apresenta espessura variando entre 8 km (nos polos) e 16 km (no equador) e contém cerca de 75% da massa molecular da atmosfera. Nessa camada, a temperatura se reduz com a altitude a uma taxa aproximada de $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, atingindo temperaturas tão baixas quanto -60°C .

Logo acima dessa camada, encontra-se a estratosfera, a qual se estende até a altura de aproximadamente 50 km. Ela contém cerca de 10% da massa molecular da atmosfera, inclusive grande parte do ozônio atmosférico total, o qual alcança uma densidade máxima em 22 km de altitude. A absorção de radiação ultravioleta do sol pelo ozônio provoca um aumento de temperatura dessa camada até cerca de 0°C em seu nível máximo.

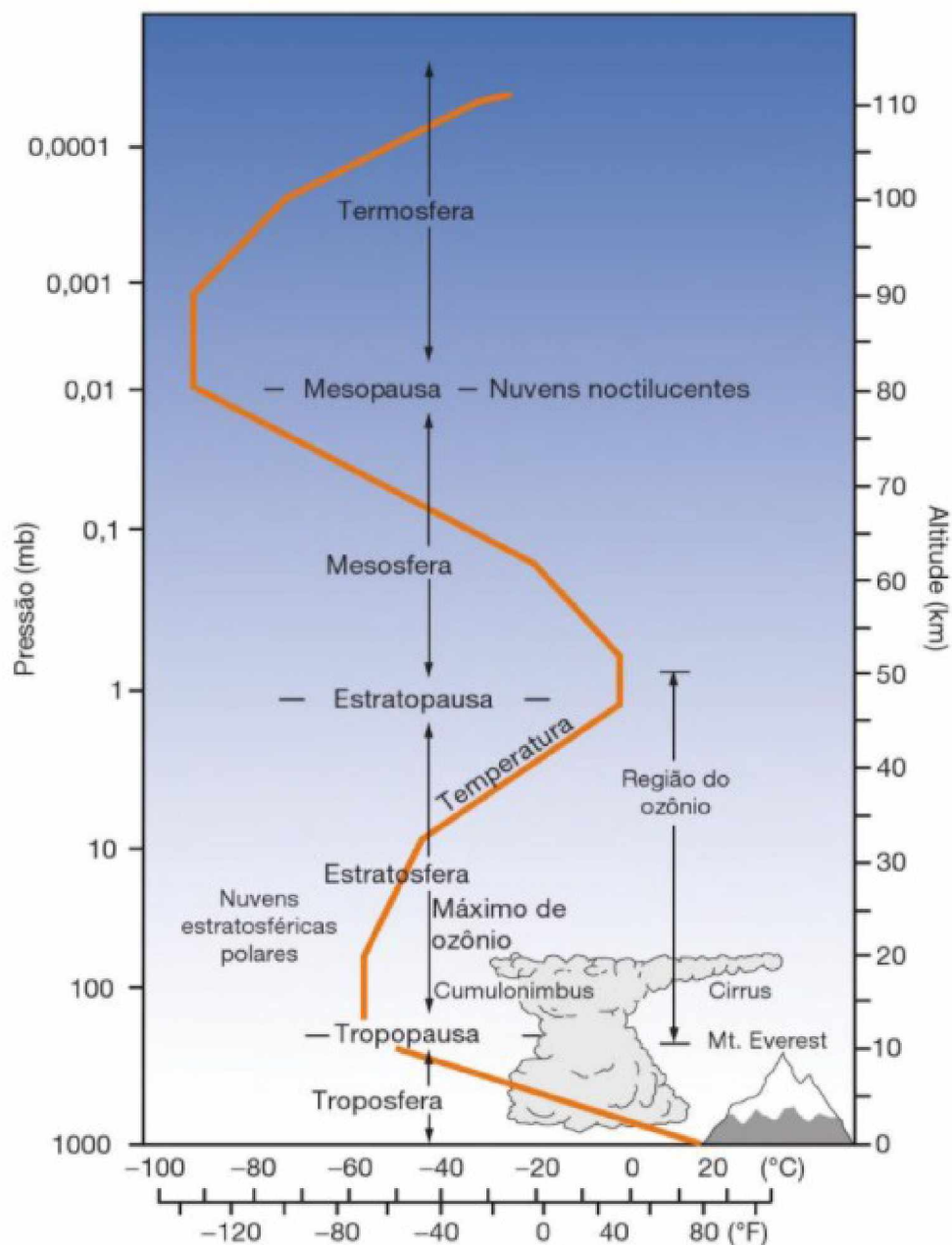
A mesosfera se situa logo acima da estratosfera. A pressão nessa camada é muito baixa, variando de 100 Pa (1 milibar), a 50 km de altitude, até 1 Pa (0,01 milibar) ou menos em sua altitude máxima, de 90 km, onde a temperatura chega a um mínimo de -133°C .

A camada seguinte é a termosfera. Nessa camada, as temperaturas voltam a subir com a altura devido à absorção da radiação ultravioleta extrema pelo oxigênio molecular (O_2) e

atômico (O) ali presentes. A camada final é a exosfera, cuja base fica em uma altitude entre 500 e 750 km.

A Figura 2 mostra uma representação das camadas da atmosfera terrestre e as variações de temperatura e pressão em função da altitude até aproximadamente 110 km.

Figura 2 - Representação das camadas da atmosfera terrestre e das variações de temperatura e pressão com a altitude.



Fonte: Barry e Chorley (2013), Figura 2.16.

A troposfera é a zona onde os fenômenos climáticos são mais acentuados. Segundo Lisboa (2010), o movimento do ar pode ser no sentido horizontal ou vertical. Os ventos

(principais responsáveis pelo movimento horizontal), quando fortes o suficiente, são capazes de dispersar poluentes atmosféricos antes que eles se acumulem. No entanto, barreiras físicas naturais (como montanhas, colinas) ou artificiais (como edifícios em cidades) diminuem a velocidade do vento, reduzindo o efeito dissipativo e fazendo com que esse fator dependa mais intensamente do movimento vertical.

Em condições normais, as altas temperaturas da superfície terrestre aquecem o ar mais próximo a esta, tornando-o menos denso que o ar mais frio imediatamente acima dessa camada. Isso faz com que esse ar quente se movimente verticalmente através da troposfera, criando correntes ascendentes de ar, dispersando os contaminantes e renovando o ar que estava em contato com o solo.

No entanto, determinadas condições meteorológicas podem provocar uma inversão no esquema normal de variação de temperatura na troposfera, provocando a inversão térmica. Quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma de ar frio, o movimento ascendente do ar é impedido e os poluentes atmosféricos se acumulam próximos à superfície (Figura 3). Apesar de ocorrer durante todo o ano, na estação de inverno a altura da camada de inversão ocorre mais próximo da superfície, sobretudo durante a noite. Esse fenômeno é agravado nas grandes cidades, sobretudo em função do intenso tráfego de veículos e da presença de indústrias nos arredores.

Figura 3 - Representação do fenômeno de inversão térmica.



Fonte: autor (2021).

2.2 POLUENTES DE INTERESSE

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021), poluentes atmosféricos são substâncias presentes no ar em concentração suficiente a torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde e ao bem-estar público ou que possam causar danos aos materiais, à fauna e à flora, prejudicando as atividades normais da comunidade.

Os poluentes podem ser primários (emitidos diretamente por diversos tipos de fontes) ou secundários (formados pela reação entre os poluentes primários e os componentes naturalmente presentes no ar).

Material Particulado (MP) é a denominação geral de uma mistura de compostos no estado sólido ou líquido que se mantêm suspensos na atmosfera devido ao reduzido tamanho de suas partículas. Nessa categoria, se enquadram:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS): em geral definidas como aquelas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 50 μm ;
- Partículas Inaláveis: aquelas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 μm , também conhecidas como Material Particulado – MP_{10} ;
- Partículas Inaláveis Finas: aquelas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 μm , também conhecidas como Material Particulado – $\text{MP}_{2,5}$; e
- Fumaça: material particulado proveniente de processos de combustão, relacionado ao teor de fuligem na atmosfera e cuja medição é feita pela refletância da luz incidente sobre a poeira.

O diâmetro aerodinâmico de uma partícula é definido como o diâmetro da esfera que apresenta a mesma velocidade terminal da partícula em questão. Esse parâmetro é importante por caracterizar o comportamento da partícula na atmosfera (HINDS, 1982). Quanto maior o diâmetro aerodinâmico da partícula, mais rapidamente ela se deposita pela ação da força da gravidade. E quanto menor a partícula, maior será a sua permanência na atmosfera. Enquanto uma partícula com 5.000 μm (ou 5 mm) de diâmetro levaria 1,8 minuto para se depositar ao cair de uma altitude de 1 km, a partícula de 10 μm de diâmetro levaria 3,6 dias para percorrer a mesma distância (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Além de se manter em suspensão na atmosfera por mais tempo, as partículas menores que 10 μm causam preocupação uma vez que elas podem ser inaladas e causar sérios problemas de saúde. Segundo a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA, 2021a), a exposição a essas partículas pode afetar os pulmões e o coração, causando irritação das vias aéreas, tosse, dificuldade em respirar, asma agravada, redução na função pulmonar, arritmias e ataques cardíacos e até a morte prematura em pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares pré-existentes.

Entre os poluentes gasosos comumente presentes na atmosfera, sobretudo em locais com alta densidade demográfica, destacam-se:

- Dióxido de Enxofre (SO_2): resultante da queima de compostos contendo enxofre, como os resíduos de combustíveis. Um dos principais responsáveis pela formação da chuva ácida;
- Monóxido de Carbono (CO): presente em locais de alta circulação de veículo, é resultante, principalmente, da queima incompleta de combustíveis fósseis e de biomassa. É incolor, inodoro e altamente prejudicial à saúde humana;
- Óxidos de Nitrogênio (NO_x): emitidos, principalmente, por veículos em grandes cidades. Sob a ação da luz solar, o NO pode reagir e formar o NO_2 , um composto que, além de ser prejudicial à saúde em altas concentrações, ainda é um precursor de agentes fotoquímicos, como o ozônio;
- Ozônio (O_3): apesar de ser um composto essencial para prevenir o aquecimento global quando se encontra na estratosfera, o ozônio pode ser prejudicial à saúde humana e à vegetação quando presente na troposfera, próximo ao nível do mar, na faixa em que respiramos.

O ozônio presente na estratosfera ocorre naturalmente, formando uma camada protetora contra os nocivos raios ultravioleta do sol. Já o ozônio troposférico, ao nível do solo, é formado por reações químicas entre os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os compostos orgânicos voláteis (VOC), normalmente emitidos por veículos e indústrias, na presença da luz solar. Dias quentes e ensolarados favorecem a reação de formação do ozônio troposférico em ambientes urbanos. No entanto, esse poluente pode também atingir as áreas rurais, uma vez que ele pode ser transportado por longas distâncias pelo vento. Em altas concentrações, o ozônio pode prejudicar a saúde sobretudo de pessoas com asma. No meio ambiente, o

poluente pode afetar a vegetação e ecossistemas sensíveis, especialmente em períodos de crescimento vegetal (EPA, 2021b).

Os compostos estudados neste trabalho são as Partículas Totais em Suspensão (PTS), as Partículas Inaláveis (MP_{10}) e o Ozônio (O_3).

2.3 RESOLUÇÕES DO CONAMA

O Conselho Nacional do Meio Ambiente é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente – Sisnama. Foi instituído pela Lei nº 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto nº 99.274/90. O Conama possui como competências:

- estabelecer normas e critérios para o licenciamento de atividades poluidoras, em nível federal, estadual e municipal;
- estabelecer, privativamente, normas e padrões nacionais de controle da poluição causada por veículos automotores, aeronaves e embarcações;
- estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente, visando o uso racional dos recursos ambientais;
- estabelecer os critérios técnicos para a declaração de áreas críticas, saturadas ou em vias de saturação;
- estabelecer sistemática de monitoramento, avaliação e cumprimento das normas ambientais; entre outras.

Nessa linha, destacam-se algumas resoluções editadas pelo Conama, as quais serão abordadas adiante.

2.3.1 Resolução Conama nº 003/1990 (revogada)

A Resolução Conama nº 003/1990 (CONAMA, 1990) dispunha sobre padrões de qualidade do ar relacionados aos poluentes: partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), oxônio (O_3) e

dióxido de nitrogênio (NO₂). Os limites máximos de concentração no ar atmosférico haviam sido estabelecidos considerando um padrão primário e um secundário de qualidade do ar. O padrão primário foi definido como as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderiam afetar a saúde da população. Já o padrão secundário seriam as concentrações de poluentes abaixo das quais poderia se prever o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população ou o mínimo dano à fauna, flora, materiais e meio ambiente em geral.

Essa norma abordava também um Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar. Para todos os poluentes abrangidos na norma, foram estabelecidas concentrações máximas referentes aos níveis de atenção, alerta e emergência. Cada nível seria declarado quando, prevendo-se a manutenção de emissões e condições meteorológicas desfavoráveis nas 24 horas subsequentes, fosse atingida uma ou mais concentrações máximas. A ocorrência dos níveis de atenção e de alerta teriam por objetivo evitar o atingimento do nível de emergência.

A Tabela 1 mostra os limites, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de concentração dos poluentes expressos na Resolução Conama n° 003/1990 para cada um dos padrões e níveis.

Tabela 1 - Limites estabelecidos na Resolução Conama n° 003/1990 (revogada).

Poluente	Referência temporal	Padrões e níveis (limites em $\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
		Secundário	Primário	Atenção	Alerta	Emergência
PTS	Anual	60	80	-	-	-
	24h	150	240	375	625	875
Fumaça	Anual	40	60	-	-	-
	24h	100	150	250	420	500
Partículas Inaláveis	Anual	50	50	-	-	-
	24h	150	150	250	420	500
SO ₂	Anual	40	80	-	-	-
	24h	100	365	800	1.600	2.100
CO	8h	10.000	10.000	17.000	34.000	46.000
	1h	40.000	40.000	-	-	-
O ₃	1h	160	160	400	800	1.000
NO ₂	Anual	100	100	-	-	-
	1h	190	320	1.130	2.260	3.000

Fonte: Conama (1990).

2.3.2 Resolução Conama nº 005/1989 (revogada em partes)

A Resolução Conama nº 005/1989 (CONAMA, 1989) dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – Pronar. Seus itens revogados pela Resolução Conama nº 491/2018 foram o 2.2.1 e o 2.3. O item 2.2.1 estabelecia e definia os padrões primário e secundário de qualidade do ar, abordados anteriormente. O item 2.3 estabelecia uma classificação de usos pretendidos de áreas, visando à implementação de uma política de não deterioração significativa da qualidade do ar no território nacional. Cada área seria considerada de Classe I, II ou III, respeitando-se os limites estabelecidos pelos padrões primário ou secundário de qualidade.

2.3.3 Resolução Conama nº 491/2018 (em vigor)

A Resolução Conama nº 491/2018 (CONAMA, 2018) dispõe sobre padrões de qualidade do ar atmosférico. Ela entrou em vigor em 19/11/2018 e revogou as Resoluções Conama nº 003/1990 (no todo) e nº 005/1989 (em parte, apenas itens 2.2.1 e 2.3).

A resolução substituiu o uso dos padrões primário e secundário de qualidade do ar por um Padrão de Qualidade do Ar Final (PF), conforme valores guia definidos pela OMS em 2005. Visando à adequação gradual dos novos padrões finais definidos nessa resolução – mais restritivos que os padrões primários da resolução anterior –, foram estipuladas três etapas intermediárias.

Os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários I (PI-1) entrariam em vigor na data de publicação da resolução (19/11/2018). Já os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários II e III e Final (PI-2, PI-3 e PF) seriam adotados de forma subsequente, conforme estipulado em um Plano de Controle de Emissões Atmosféricas. A resolução estabelece que esse plano deve ser elaborado pelos órgãos ambientais estaduais e distrital em até três anos após a publicação da norma – ou seja, até 19/11/2021). E também que os órgãos ambientais deverão elaborar anualmente e publicar um Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar.

A Tabela 2 traz os padrões de qualidade do ar estipulados na Resolução Conama nº 491/2018.

Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar estabelecidos na Res. Conama nº 491/2018 (em vigor).

Poluente atmosférico	Período de referência	Padrões de qualidade do ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^(a)							
		PI-1	PI-2	PI-3	Padrão Final	Atenção	Alerta	Emerg.	Boa qualid.
MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	250	420	500	0 – 50
	Anual	40	35	30	20	-	-	-	-
MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	125	210	250	0 – 25
	Anual	20	17	15	10	-	-	-	-
SO ₂	24 horas	125	50	30	20	800	1.600	2.100	0 – 20
	Anual	40	30	20	-	-	-	-	-
NO ₂	1 hora	260	240	220	200	1.130	2.260	3.000	0 – 200
	Anual	60	50	45	40	-	-	-	-
O ₃	8 horas	140	130	120	100	200	400	600	0 – 100
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-	-	-	-
	Anual	40	35	30	20	-	-	-	-
CO (ppm) ^(a)	8 horas	-	-	-	9	15	30	40	0 – 9
PTS	24 horas	-	-	-	240	-	-	-	-
	Anual	-	-	-	80	-	-	-	-
Pb	Anual	-	-	-	0,5	-	-	-	-

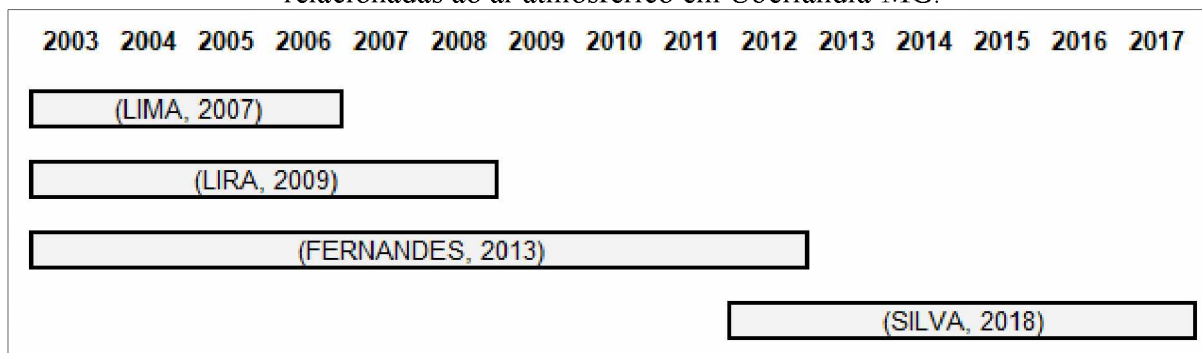
Nota: (a) as concentrações de todos os poluentes estão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, exceto as de CO, em ppm. Fonte: Conama (2018).

A resolução trouxe como inovação, além dos parâmetros mais restritivos, a adoção do monitoramento dos poluentes “Material Particulado – MP_{2,5}” e “Chumbo – Pb” – este último, porém, a ser monitorado apenas em áreas específicas, em função da tipologia das fontes de emissão e a critério do órgão ambiental competente. Estipulou, ainda, um Índice de Qualidade do Ar (IQAR) e definiu uma faixa de concentração dentro da qual a qualidade do ar é considerada boa para determinados poluentes (coluna da direita da Tabela 2).

2.4 QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO DE UBERLÂNDIA-MG

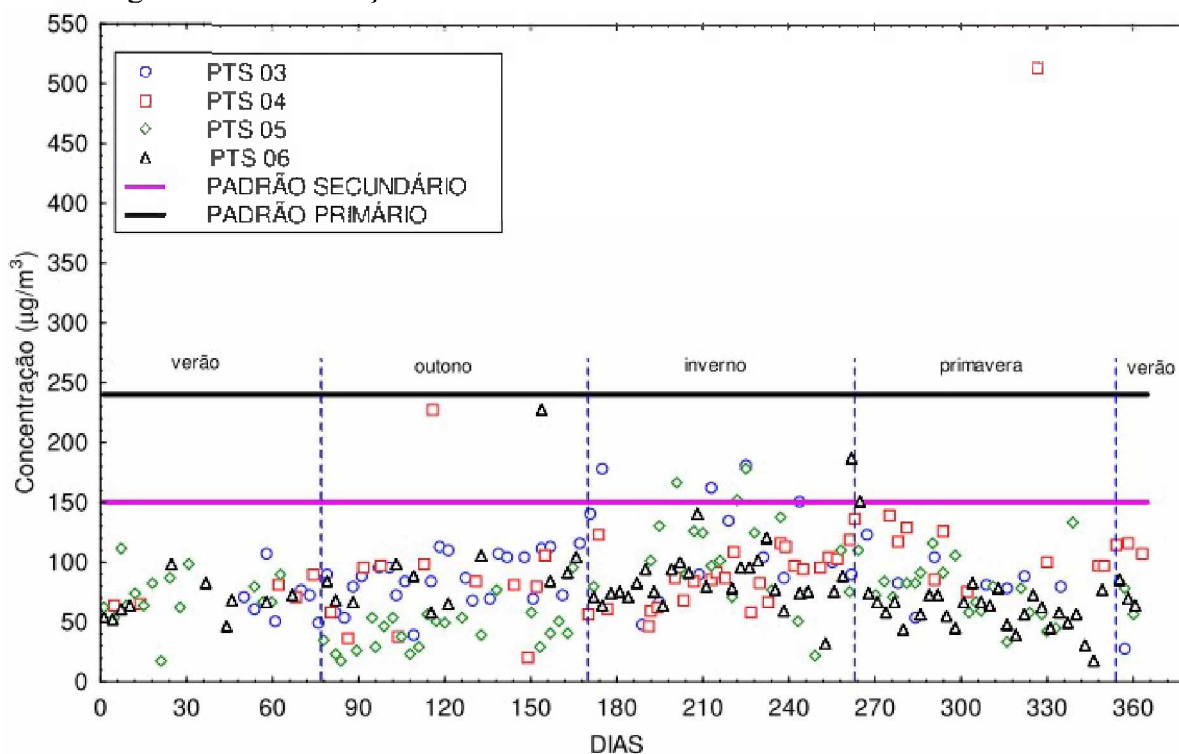
A Figura 4 mostra uma linha do tempo de algumas das pesquisas, no campo da Engenharia Química, relacionadas ao ar atmosférico em Uberlândia-MG, indicando os períodos de dados utilizados pelos autores citados neste capítulo de Revisão Bibliográfica.

Figura 4 - Linha do tempo de algumas das pesquisas, no campo da Engenharia Química, relacionadas ao ar atmosférico em Uberlândia-MG.



O monitoramento da qualidade do ar atmosférico em Uberlândia-MG começou a ser feito de forma sistemática a partir de 2003. Lima (2007) estudou a concentração dos poluentes PTS e MP_{10} entre 2003 e 2006, comparando os resultados das medições com os padrões estabelecidos na legislação vigente àquela época (Resolução Conama nº 003/1990). A Figura 5 mostra os resultados de concentração de PTS medidos nesse período, separados por estação do ano.

Figura 5 - Concentração diária de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2006.

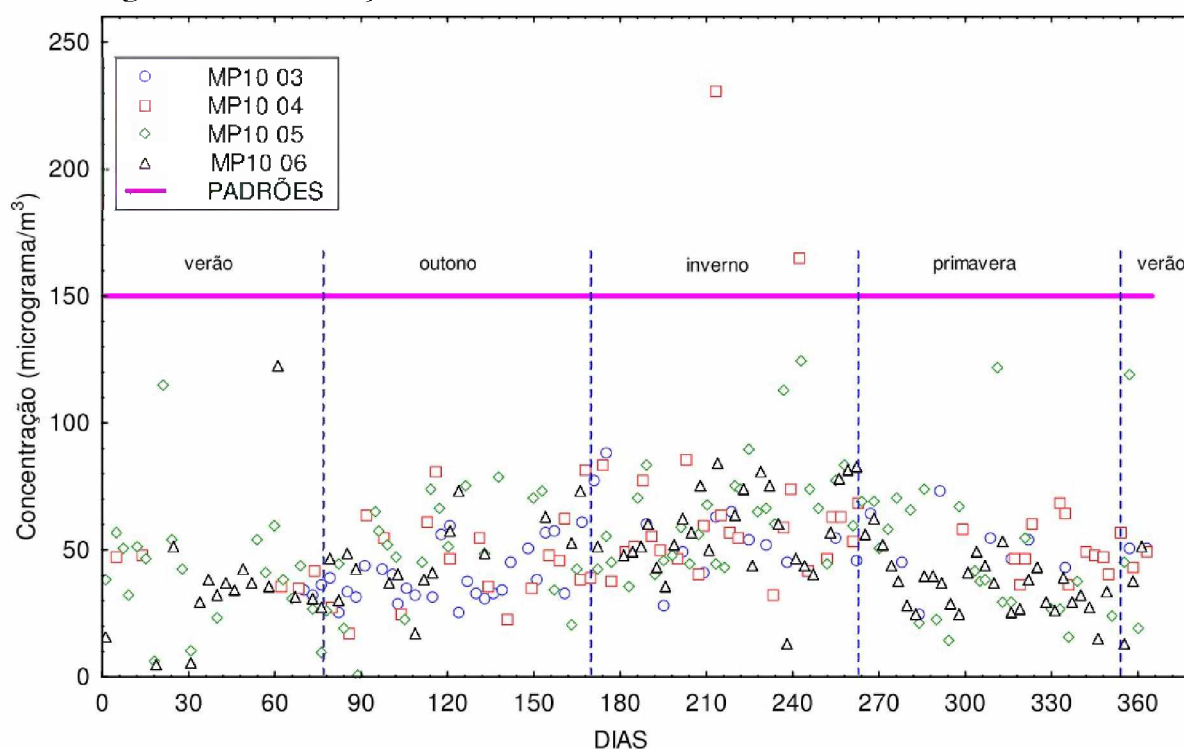


Fonte: Lima (2007), Figura 4.8.

Segundo o autor, a maioria dos resultados de concentração de PTS no ar atmosférico se situou na faixa entre 50 e 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Em geral, o inverno foi a estação do ano que apresentou as maiores médias, reunindo a maioria das ultrapassagens do padrão secundário de qualidade do ar, principalmente porque a frequência de chuvas é menor nesse período, reduzindo a umidade do ar e, conseqüentemente, a deposição de partículas, as quais deixam de se aglutinar com as moléculas de água, escassas no ar atmosférico.

A Figura 6 mostra os resultados da concentração de MP_{10} entre 2003 e 2006, também separados por estações do ano. Segundo o autor, a maioria dos resultados de partículas inaláveis se situou na faixa entre 30 e 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mais uma vez, o inverno foi a estação que registrou as maiores médias, tendo sido o único período em que os padrões primário e secundário (coincidentes) foram ultrapassados (por duas vezes, no ano de 2004).

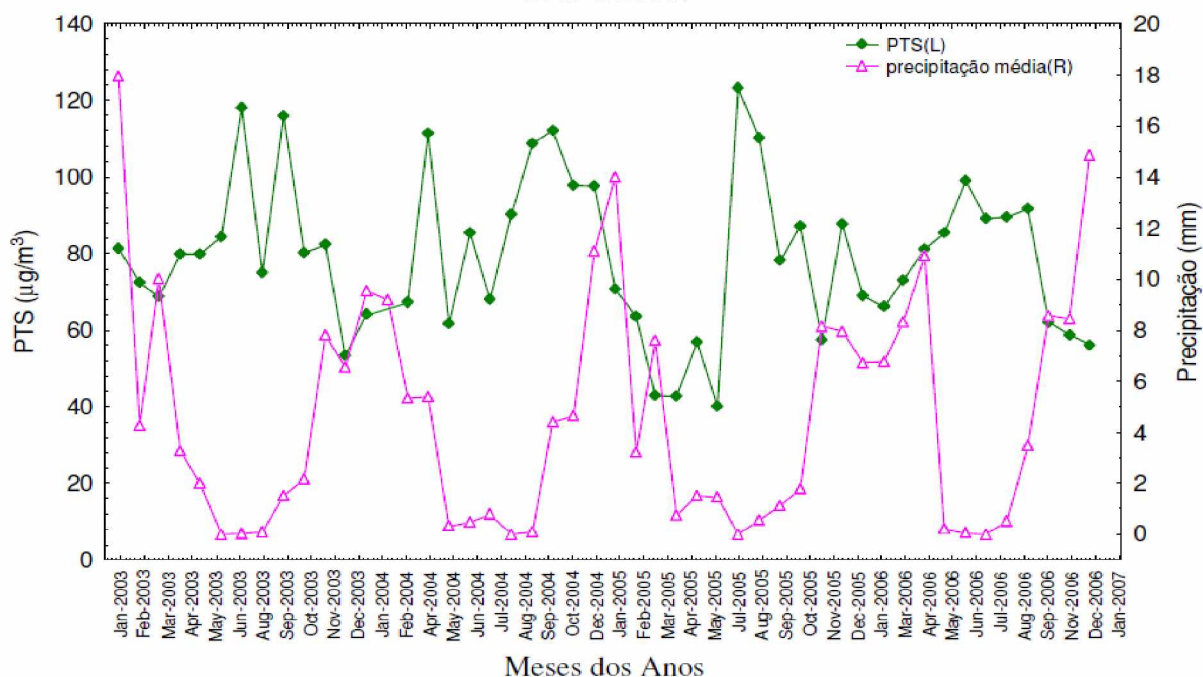
Figura 6 - Concentração diária de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2006.



Fonte: Lima (2007), Figura 4.9.

A análise gráfica também reforçou a relação inversa entre a concentração dos materiais particulados (PTS ou MP_{10}) e o índice pluviométrico ou a umidade relativa do ar. Em períodos secos, com baixa precipitação média, observou-se uma tendência de aumento na concentração dos poluentes no ar atmosférico. Já em períodos com maior precipitação, houve uma tendência de redução da poluição atmosférica, como mostra a Figura 7.

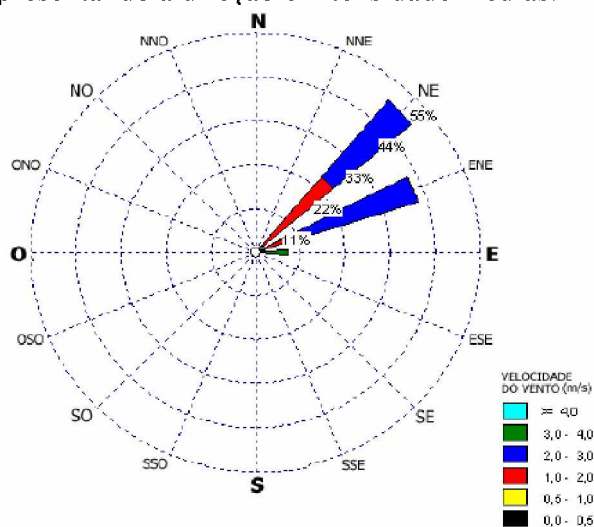
Figura 7 - Média mensal de concentração de PTS e de precipitação em Uberlândia-MG entre 2003 e 2006.



Fonte: Lima (2007). Figura 4.11

Ao analisar a direção do vento em Uberlândia-MG, Lima (2007) constatou que as direções predominantes foram de Nordeste (NE) e Leste-nordeste (ENE). Como o Distrito Industrial de Uberlândia-MG se localiza na região nordeste da cidade, a Figura 8 nos indica que, em aproximadamente 50% do tempo, as partículas advindas das chaminés das indústrias ali presentes são transportadas em direção ao centro da cidade, trazendo a poluição para a população do município, sobretudo nos meses em que a velocidade dos ventos é mais elevada.

Figura 8 - Rosa dos ventos em Uberlândia-MG no período de 2003 a 2006, representando a direção e intensidade médias.

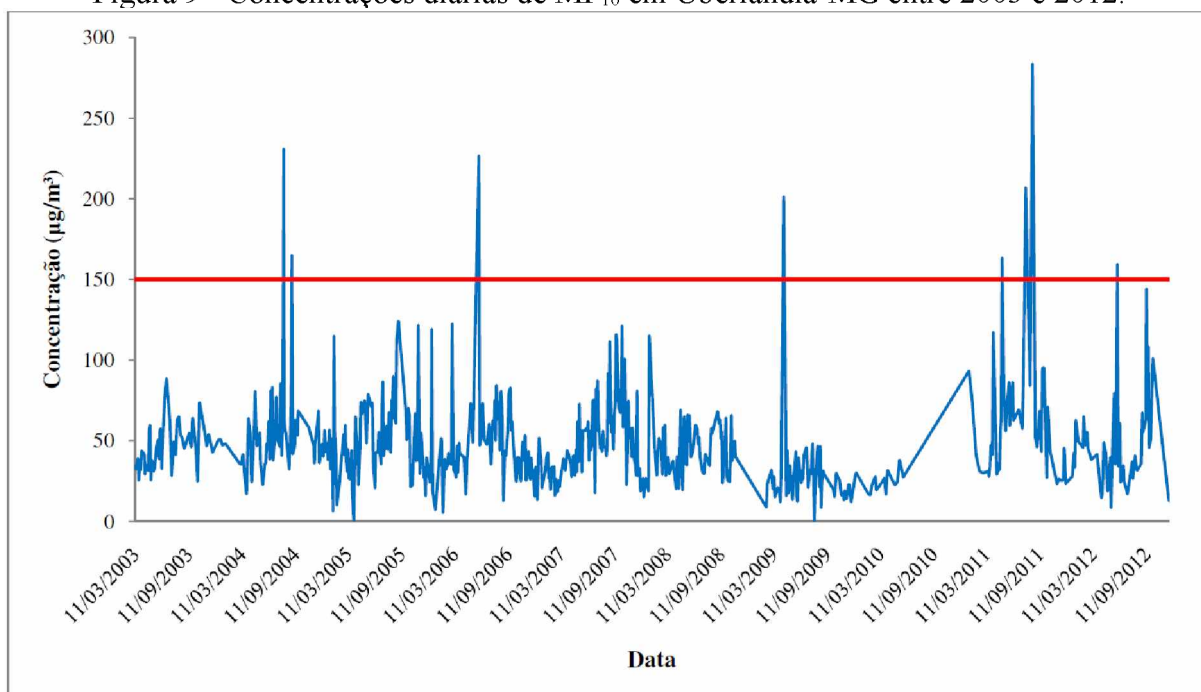


Fonte: Lima (2007), Figura 4.5.

Lira (2009) desenvolveu modelos empíricos para prever a concentração de MP_{10} em Uberlândia-MG, usando variáveis meteorológicas e fluxo de veículos como dados de entrada. Observou-se uma correlação inversa da concentração de MP_{10} com umidade relativa, precipitação e nebulosidade. Comparando-se com insolação e fluxo de veículos, a concentração do poluente apresentou uma correlação direta. Não se observou correlação com temperatura, velocidade do vento e direção do vento. A precipitação foi a variável que apresentou a maior intensidade absoluta de correlação (-0,494, na escala de -1 a +1), seguida da nebulosidade (-0,361), insolação (0,296), umidade relativa (-0,268) e fluxo de veículos (0,197). Ainda assim, as correlações identificadas foram consideradas como fracas.

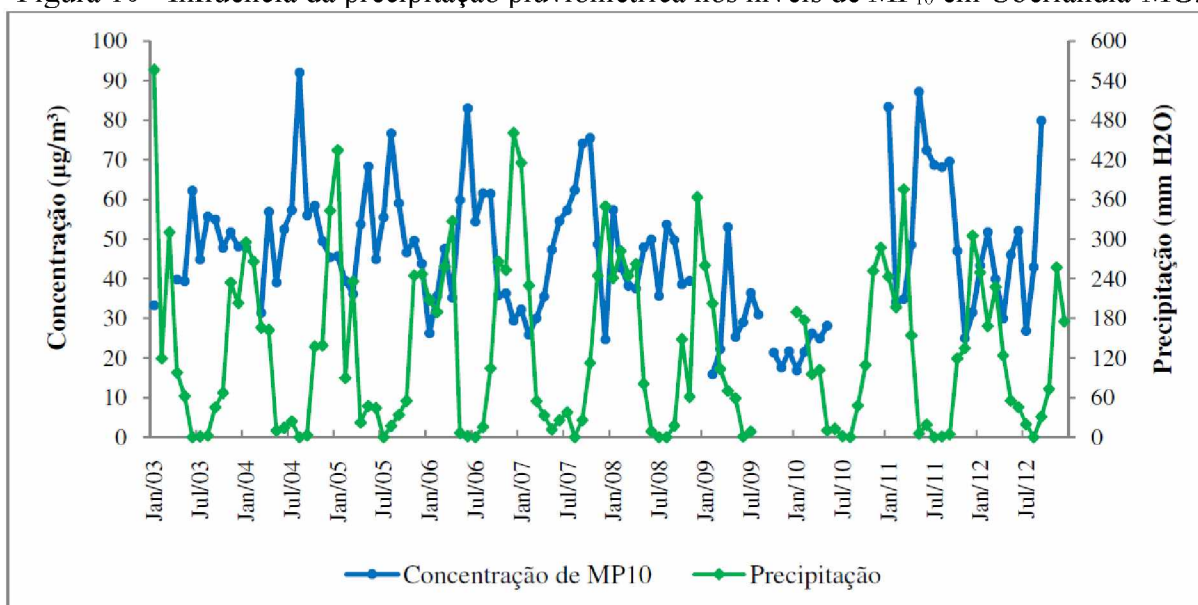
Fernandes (2013) estudou a concentração de material particulado de origem veicular em Uberlândia-MG. Os dados de medições realizadas entre os anos de 2003 e 2012 (Figura 9) – com ausência parcial de dados entre 2009 e 2010 – foram utilizados para desenvolvimento de um modelo matemático Gaussiano CAL3QHC para predição da concentração de MP_{10} . Nas estações secas do ano, foram observados períodos críticos em que os limites estabelecidos pela Resolução Conama nº 3/1990 foram ultrapassados.

Figura 9 - Concentrações diárias de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2012.

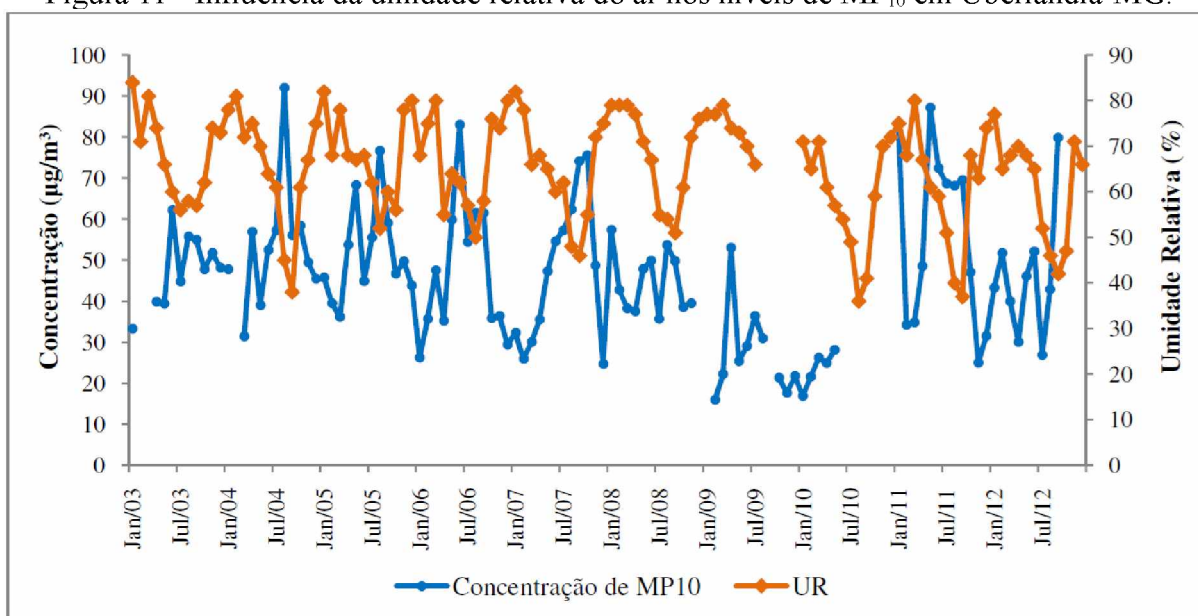


Fonte: Fernandes (2013), Figura 27.

Ao analisar o efeito das condições atmosféricas, o autor observou que tanto a precipitação pluviométrica quanto a umidade relativa do ar apresentaram influência inversa na concentração de MP_{10} , como se pode notar nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Influência da precipitação pluviométrica nos níveis de MP_{10} em Uberlândia-MG.

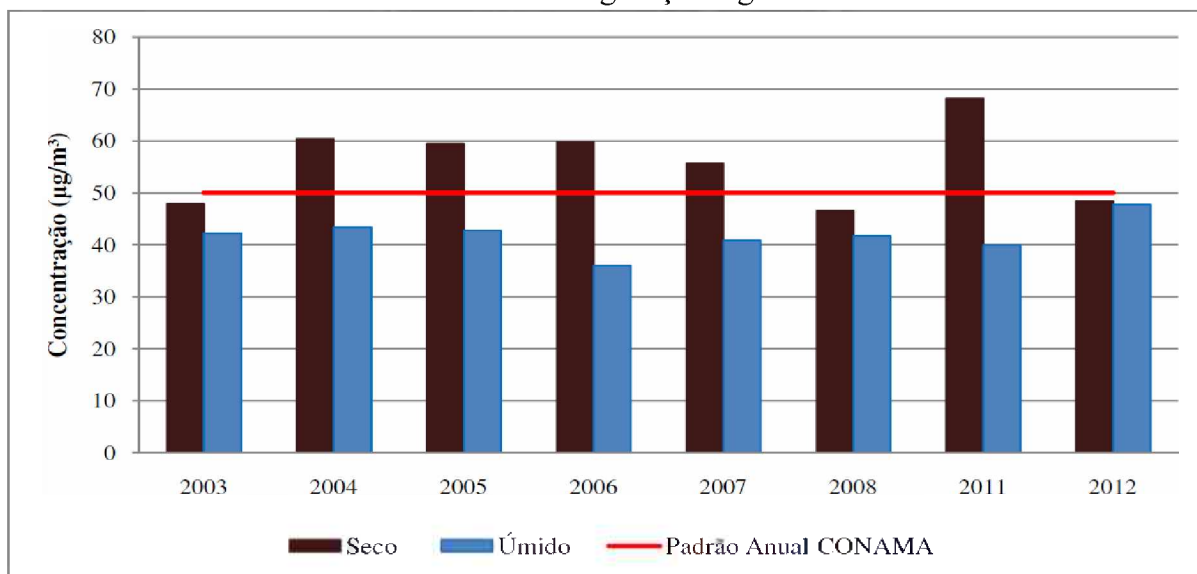
Fonte: Fernandes (2013), Figura 29.

Figura 11 - Influência da umidade relativa do ar nos níveis de MP_{10} em Uberlândia-MG.

Fonte: Fernandes (2013), Figura 30.

Na comparação das concentrações médias de MP_{10} dos períodos seco (abril a setembro) e úmido (outubro a março) com a legislação vigente à época do estudo, o autor observou que os limites da Resolução Conama nº 003/1990 foram ultrapassados apenas nos períodos secos em cinco dos anos estudados (Figura 12).

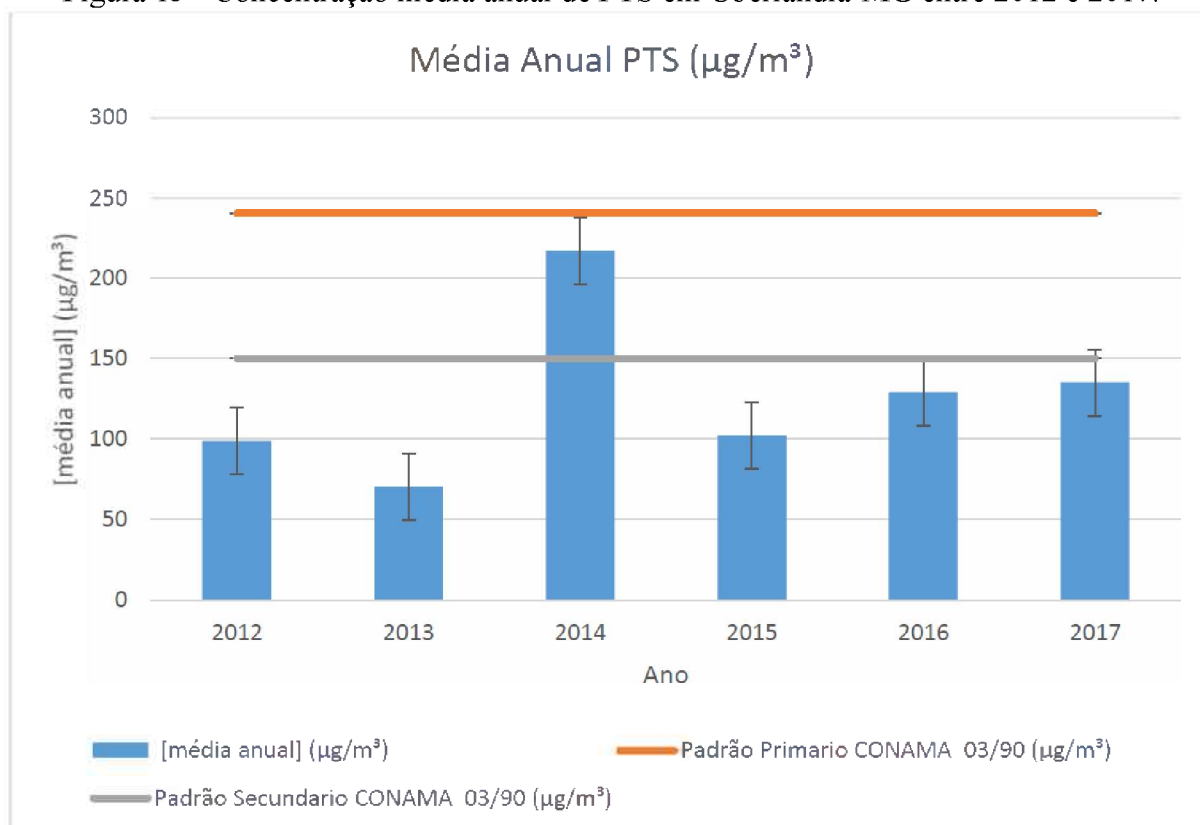
Figura 12 - Comparação da concentração de MP_{10} em Uberlândia-MG nos períodos seco e úmido com a legislação vigente.



Fonte: Fernandes (2013), Figura 32.

Silva (2018) estudou a concentração de materiais particulados na região central de Uberlândia-MG entre os anos de 2012 e 2017. As concentrações médias anuais de PTS são apresentadas na Figura 13.

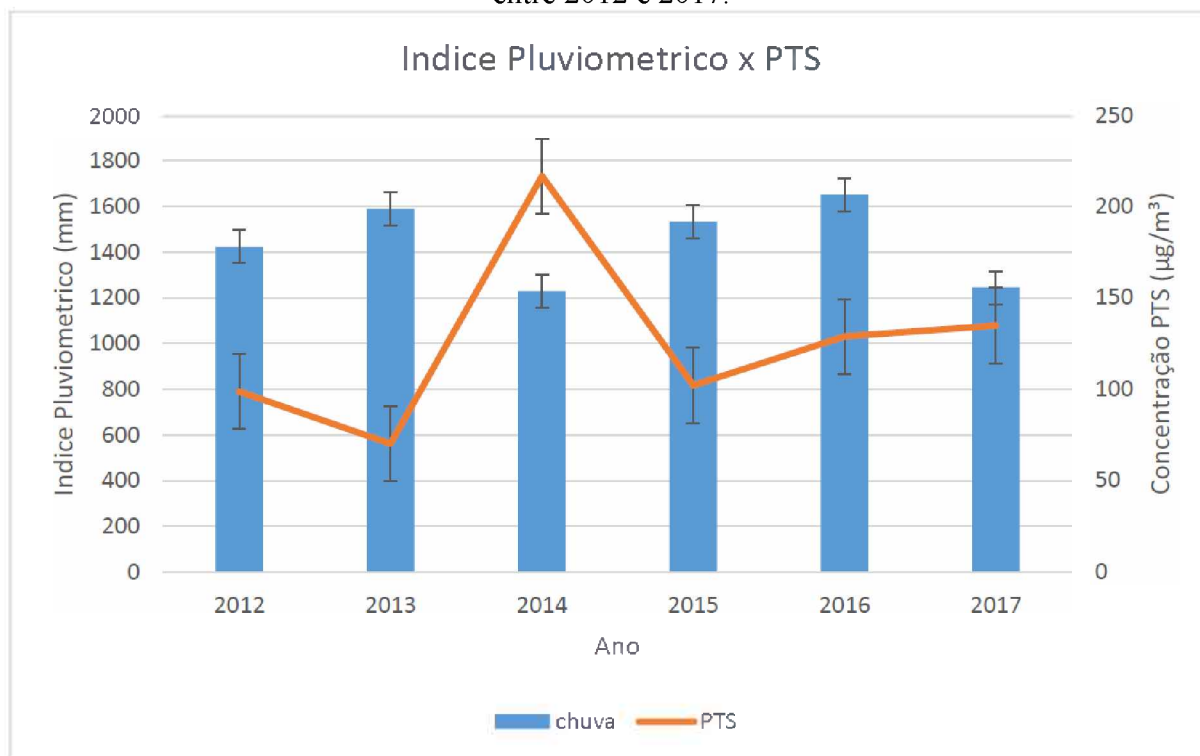
Figura 13 - Concentração média anual de PTS em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.



Fonte: Silva (2018), Figura 19.

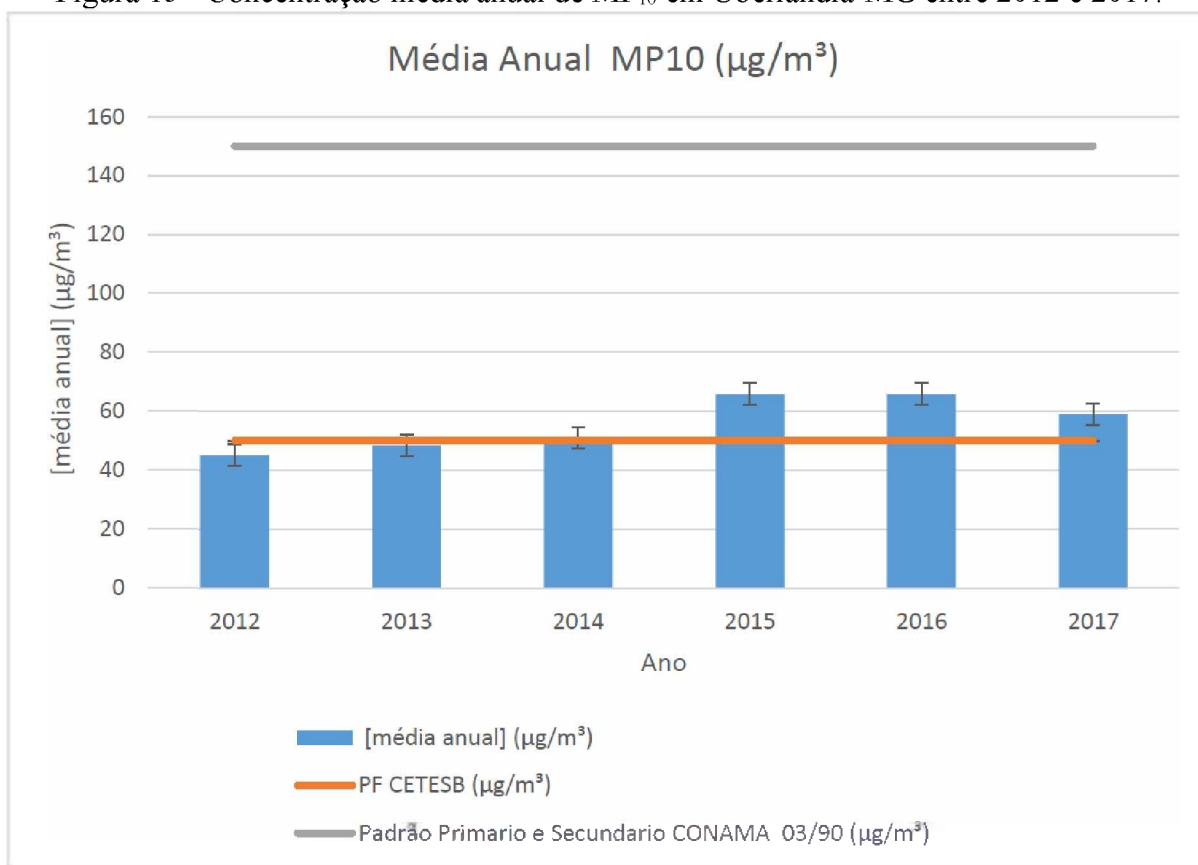
Nota-se que a concentração média de PTS em 2014 destoou das demais registradas e foi a única que ultrapassou o padrão secundário de qualidade do ar, definido na Resolução Conama n° 003/1990. Nesse mesmo ano, foi registrado o menor índice pluviométrico médio e umidade relativa do ar média do período analisado (Figura 14).

Figura 14 - Relação entre o índice pluviométrico e a concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.

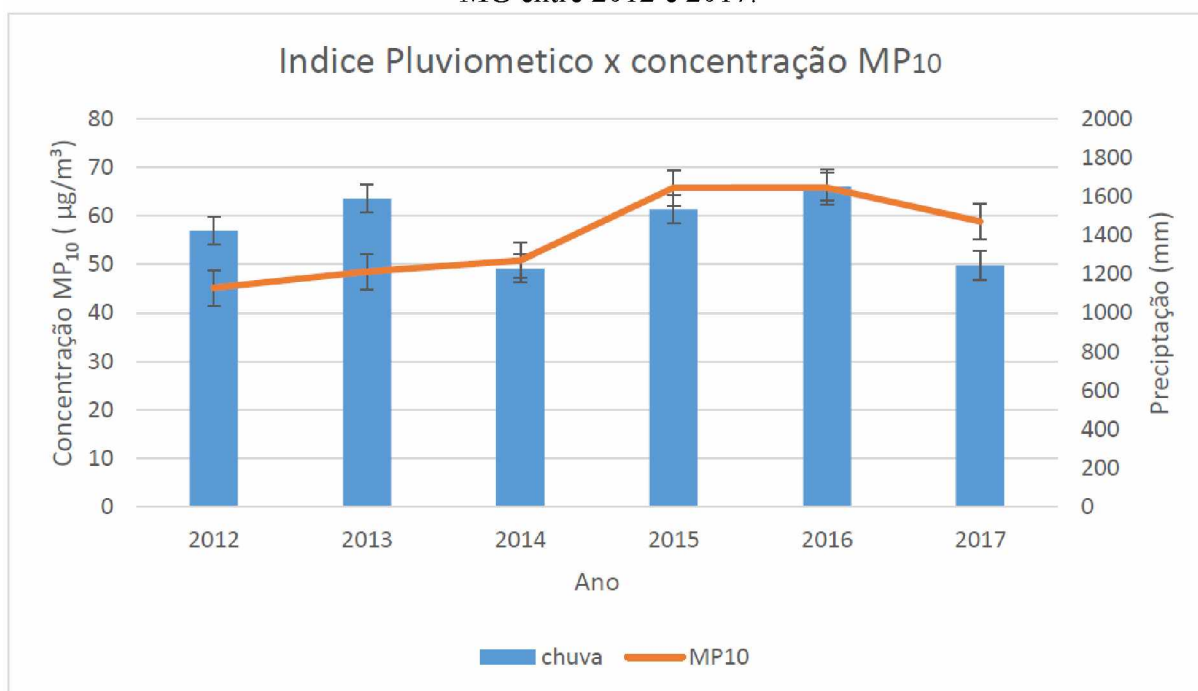


Fonte: Silva (2018), Figura 20.

As concentrações médias anuais de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017 são apresentadas na Figura 15. Diferentemente do comportamento apresentado pelo PTS, não se observou discrepância entre o ano de 2014 e os demais. Com relação ao índice pluviométrico (Figura 16), apesar de os anos de 2014 e 2017 terem apresentado as médias pluviométricas mais baixas, as maiores concentrações de MP_{10} foram registradas em 2013, 2015 e 2016. Dessa forma, o autor ressaltou que o índice pluviométrico em si não foi capaz de interferir na dispersão desse particulado, devendo outros dados meteorológicos serem também avaliados, como velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar.

Figura 15 - Concentração média anual de MP₁₀ em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.

Fonte: Silva (2018), Figura 24.

Figura 16 - Relação entre o índice pluviométrico e a concentração de MP₁₀ em Uberlândia-MG entre 2012 e 2017.

Fonte: Silva (2018), Figura 26.

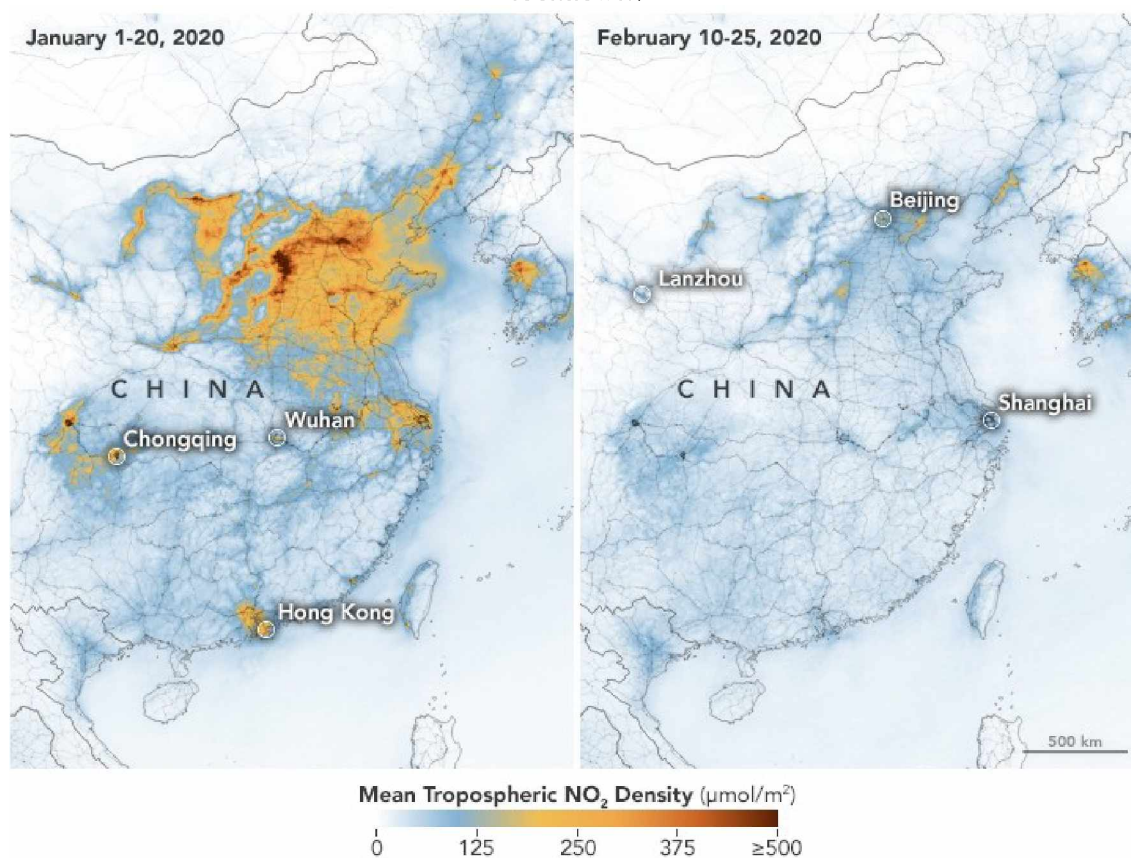
2.5 PANDEMIA DE COVID-19

Em 1/12/2019, o coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2 (SARS-CoV-2) foi pela primeira vez identificado em Wuhan, China. Em 30/12/2019, a doença do novo coronavírus, denominada Covid-19, foi declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como Emergência de Saúde Pública Internacional (ESPI) e menos de três meses depois, em 11/3/2020, como uma pandemia (ONU, 2021).

As medidas de *lockdown* tomadas em Wuhan tiveram um impacto ambiental substancial por conta da redução de emissões industriais e poluição veicular. Segundo Lian *et al.* (2020), ao comparar as condições antes do *lockdown*, a concentração de $MP_{2,5}$ foi reduzida em 36,9% e a de NO_2 em 53,3%. O ozônio seguiu em sentido contrário, apresentando um aumento na concentração em 116,6%.

A redução nos níveis de dióxido de nitrogênio na China puderam também ser detectadas pelos satélites de monitoramento de poluição das Agências Espaciais Norte-Americana e Europeia (NASA e ESA), como mostra a Figura 17.

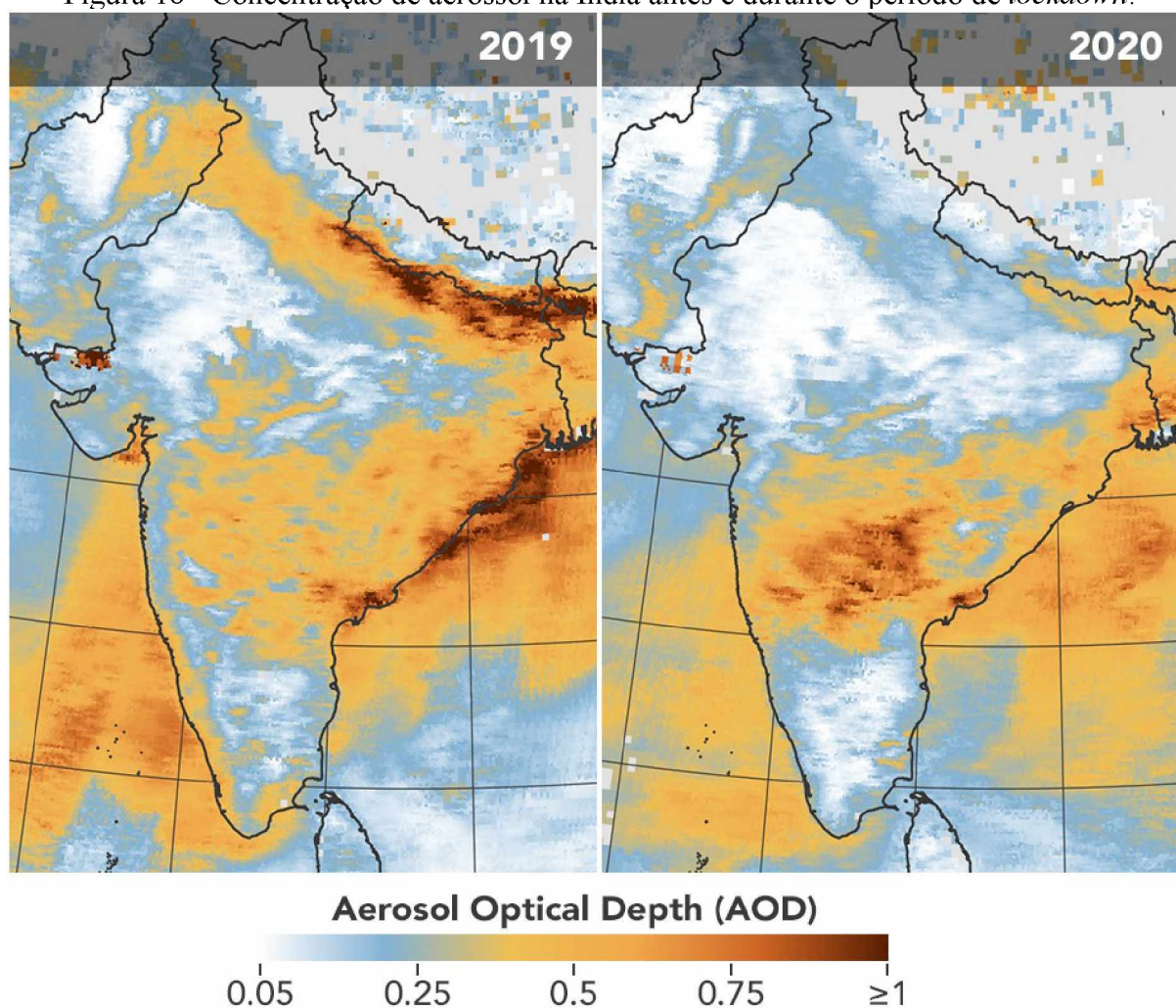
Figura 17 - Concentração de NO_2 troposférico na China antes e durante o período de *lockdown*.



Fonte: (NASA, 2020a).

O mesmo padrão também pôde ser observado em outros lugares do mundo. Kar *et al.* (2021) estudaram sete variáveis independentes de qualidade do ar em seis estados da Índia, para avaliar o status da qualidade do ar ambiental durante a pandemia. Observou-se uma redução significativa nos níveis de $MP_{2,5}$ e MP_{10} e um aumento nos níveis de O_3 na maioria das estações monitoradas. Os satélites da NASA registraram, durante o período de *lockdown* na Índia, as menores concentrações de aerossol na atmosfera nos últimos 20 anos, relatados na Figura 18.

Figura 18 - Concentração de aerossol na Índia antes e durante o período de *lockdown*.



Fonte: Adaptado de NASA (2020b).

Até o final de setembro/2021, o Brasil havia registrado três ondas de novos casos diários de indivíduos contaminados com o coronavírus da SARS-CoV-2, mostrados na Figura 19 e nas Tabelas 9e 10, em Anexo (WORLDOMETER, 2021). Os picos ocorreram em 30/7/2020 (com 46.320 novos casos diários), em 27/3/2021 (77.334 casos) e em 24/6/2021

(77.477 casos). Essas ondas, de certa forma, influenciaram o comportamento da população e dos governantes, que atuaram no sentido de editar leis, decretos e deliberações mais (ou menos) rigorosas, de acordo com o momento da pandemia.

Figura 19 - Novos casos diários de coronavírus registrados no Brasil (média móvel de 7 dias).



Fonte: Worldometer (2021).

O Município de Uberlândia-MG começou a adotar medidas restritivas de prevenção a partir de 27/2/2020 ao instituir, por meio do Decreto nº 18.523, o Comitê Municipal de Enfrentamento à Covid-19 (UBERLÂNDIA, 2020a). As primeiras medidas temporárias passaram a vigorar a partir da edição do Decreto nº 18.550, de 19/3/2020, o qual suspendeu por 60 dias atividades de capacitação e treinamento, reuniões, eventos oficiais que pudessem implicar em aglomeração de pessoas, entre outras (UBERLÂNDIA, 2020b). O Decreto nº 18.553, de 20/3/2020, determinou a suspensão por 30 dias do atendimento presencial ao público em estabelecimentos comerciais não essenciais em Uberlândia-MG (UBERLÂNDIA, 2020c).

O Decreto nº 18.592, de 20/4/2020, determinou que diversas atividades econômicas sofreriam restrição absoluta de funcionamento ao público, tais como: academias, clubes, shopping centers, cinemas, estabelecimentos dedicados à realização de festas, bares e instituições de ensino, formação e treinamento (UBERLÂNDIA, 2020d).

Em 7/10/2020, o Decreto nº 18.827 instituiu o Plano Municipal de Funcionamento das Atividades Econômicas durante o Período de Pandemia de Covid-19, com a finalidade de restabelecer de forma gradual o funcionamento das atividades econômicas do município, mediante a análise objetiva de determinados indicadores. Os setores que haviam sofrido restrição absoluta de funcionamento puderam ser reabertos.

Gradativamente, as medidas restritivas ao comércio foram sendo flexibilizadas. Em junho de 2021, por conta da decisão prolatada nos autos do Agravo de Instrumento nº 1.0000.21.016576-7/001 foi novamente autorizado o funcionamento dos estabelecimentos de ensino curricular (UBERLÂNDIA, 2021a). Esse fato gerou um aumento considerável na circulação de veículos e pessoas, especialmente pelo retorno gradativo das aulas presenciais.

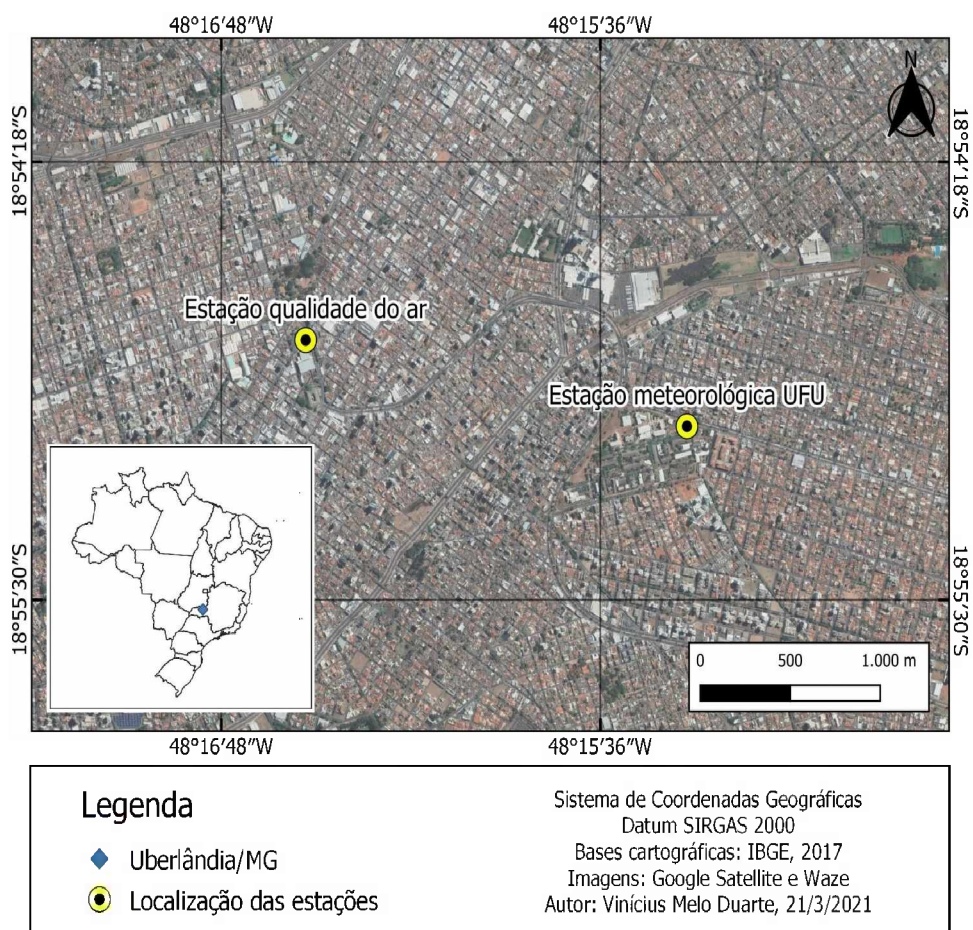
Em 19/8/2021, a Prefeitura de Uberlândia-MG expediu a Deliberação nº 12 (UBERLÂNDIA, 2021b). Considerando a significativa melhora nos indicadores e o avanço na campanha de imunização, entre outros fatores, foram revistas as restrições que haviam sido impostas nas deliberações anteriores. A maioria dos estabelecimentos comerciais tiveram o horário de funcionamento estendido até as 23 horas de segunda-feira a sábado e até as 18 horas do domingo, a partir de 22/8/2021. Essa norma novamente contribuiu para o aumento no fluxo de pessoas e veículos pelas ruas do município.

Os poluentes atmosféricos e seus efeitos sobre a saúde humana e o meio ambiente já são há muito tempo estudados e amplamente conhecidos pela comunidade científica. Os limites legais de emissão de poluentes, em âmbito nacional, são os mesmos desde a edição da Resolução Conama nº 491, de 2018. O que se alterou nos anos de 2020 e 2021 foi o padrão de comportamento humano, provocado pela pandemia de Covid-19, o qual teve impacto direto na qualidade do ar atmosférico de todo o planeta. Esse fato proporcionou uma oportunidade única de se estudar os efeitos dessa mudança comportamental, permitindo a quantificação da redução da concentração dos poluentes atmosféricos, tema tratado com destaque nesse trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

A amostragem do ar atmosférico foi realizada na estação localizada no Terminal Central de ônibus de Uberlândia-MG, indicada na Figura 20.

Figura 20 - Localização das estações de qualidade do ar e meteorológica de Uberlândia-MG.



A unidade conta com dois amostradores de grandes volumes fixos – sendo um para medição de partículas totais em suspensão (AGV-PTS) e outro para material particulado de até 10 micrômetros de diâmetro equivalente (AGV-MP10), como mostra a Figura 21. As medições de ozônio eram realizadas no mesmo local, porém com um aparelho portátil.

Figura 21 - Amostradores de grandes volumes (AGV) para partículas totais em suspensão (PTS) e partículas inaláveis (MP₁₀) instalados em Uberlândia-MG.



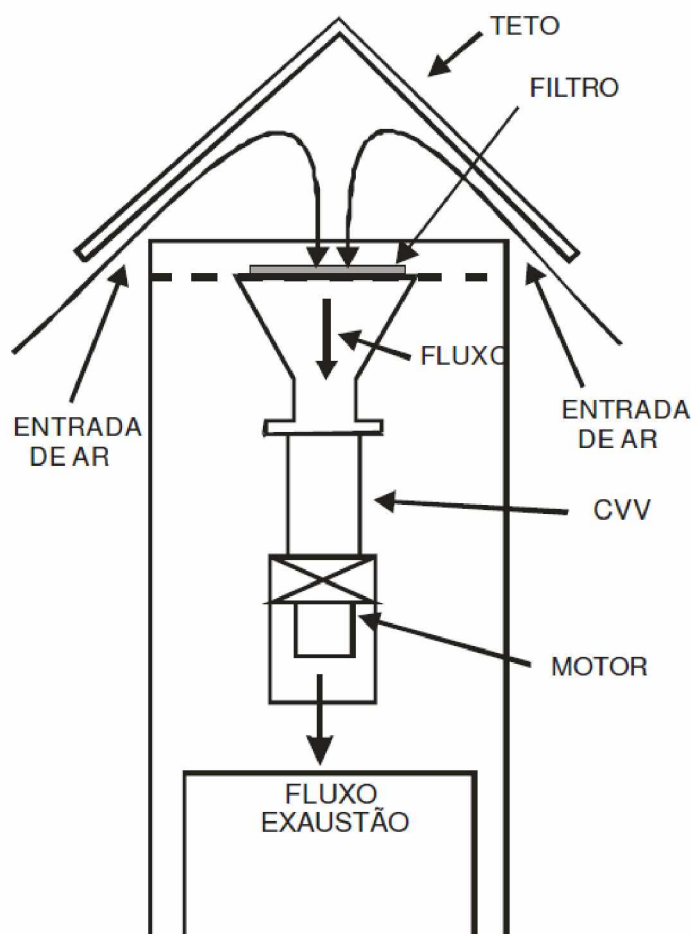
Fonte: autor (2021).

A estação meteorológica a partir da qual os dados climatológicos foram extraídos se situa no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, distante 2.130 metros do local de amostragem. O local também é indicado na Figura 20.

3.1 AMOSTRADOR DE GRANDES VOLUMES DE PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO (AGV-PTS)

Os amostradores de grandes volumes são equipamentos de funcionamento relativamente simples. A estrutura interna do AGV-PTS é mostrada na Figura 22. Ele possui um teto que o protege das intempéries, permitindo a entrada de ar pelas laterais. O fluxo de ar atravessa um porta-filtros localizado na parte superior do equipamento. Em seguida, passa por um controlador volumétrico de vazão (CVV), o qual é projetado para regular a vazão de ar em aproximadamente 1,13 m³/min. O que promove a exaustão do ar é um motoaspirador localizado na base (ENERGÉTICA, 2016a).

Figura 22 - Esquema interno do AGV-PTS.

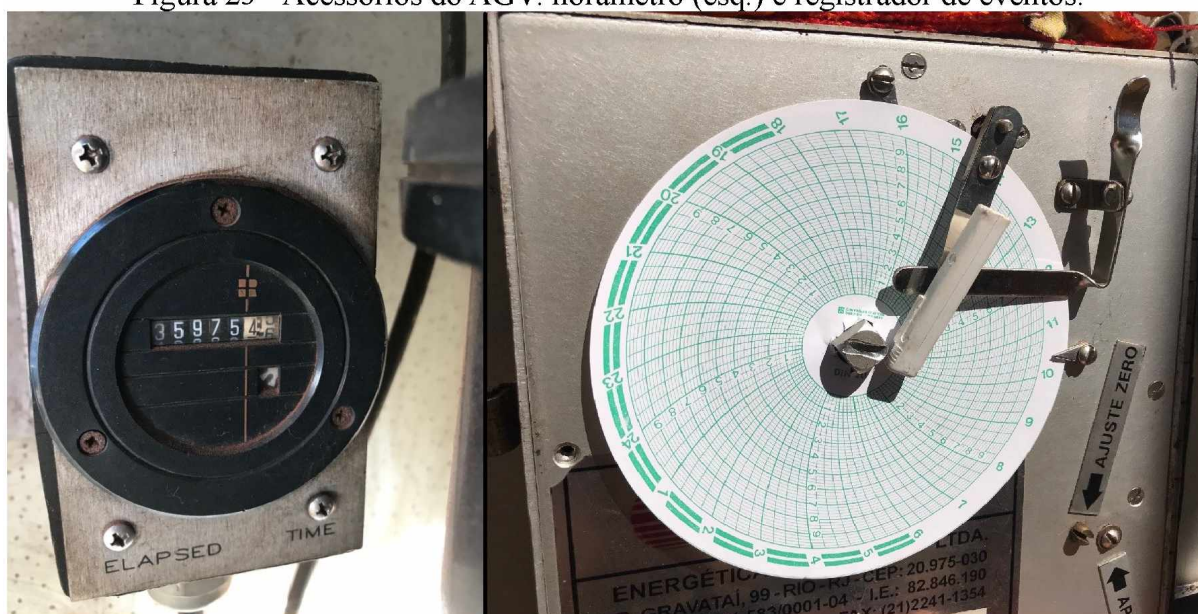


Fonte: Energética (2016a), Figura 2.1, p. 4.

O equipamento conta ainda com os seguintes acessórios (Figura 23):

- um horômetro, localizado no painel de controle, cuja função é registrar o tempo de operação do motor;
- um registrador de eventos, que é um transdutor de pressão conectado ao equipamento por meio de uma mangueira e que possui a função de registrar as oscilações de pressão em uma carta gráfica circular.

Figura 23 - Acessórios do AGV: horômetro (esq.) e registrador de eventos.



Fonte: autor (2021).

O Quadro 1 mostra os principais dados técnicos do AGV-PTS.

Quadro 1 - Principais dados técnicos do AGV-PTS

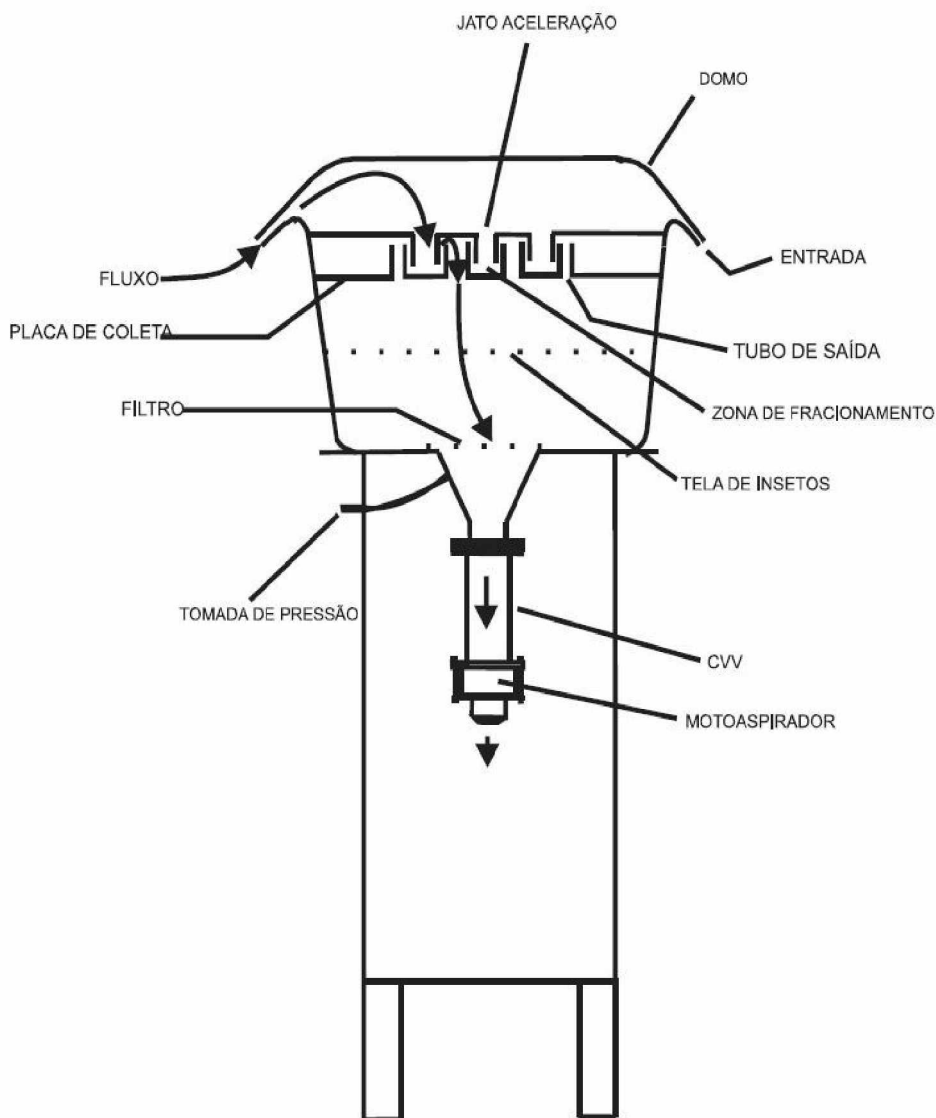
Faixa de vazão	1,13 ± 10% m ³ /min
Motosaspirador	Dois estágios, refrigeração direta, 120V, 60 Hz, monofásico, 934W, 7,9A, 23.950 rpm
Porta-filtro	Para filtros de 203 mm x 254 mm
Registrador de eventos	Transdutor de pressão, giro 24 h, carta circular de 102 mm
Programador de tempo	Digital, resolução de 1 segundo, com programação semanal
Horômetro	Eletromecânico, resolução de 1/100 h
Dimensões (base)	115 cm x 38 cm x 38 cm (A x L x P) Altura total com cabeça: 160 cm
Peso	35 kg

Fonte: Energética (2016a), Tabela 3.1, p. 11.

3.2 AMOSTRADOR DE GRANDES VOLUMES DE PARTÍCULAS INALÁVEIS (AGV-MP10)

O AGV-MP10 possui uma estrutura semelhante à do AGV-PTS, contando com os mesmos elementos principais: seção de entrada de ar, porta-filtros, controlador volumétrico de vazão, motoaspirador, horâmetro e registrador de eventos (Figura 24). A diferença fundamental desse equipamento é que sua entrada de ar é dotada de uma cabeça de separação, do tipo “impacto inercial”, cuja função é determinar um ponto de corte de 10 μm de diâmetro aerodinâmico (ENERGÉTICA, 2016b).

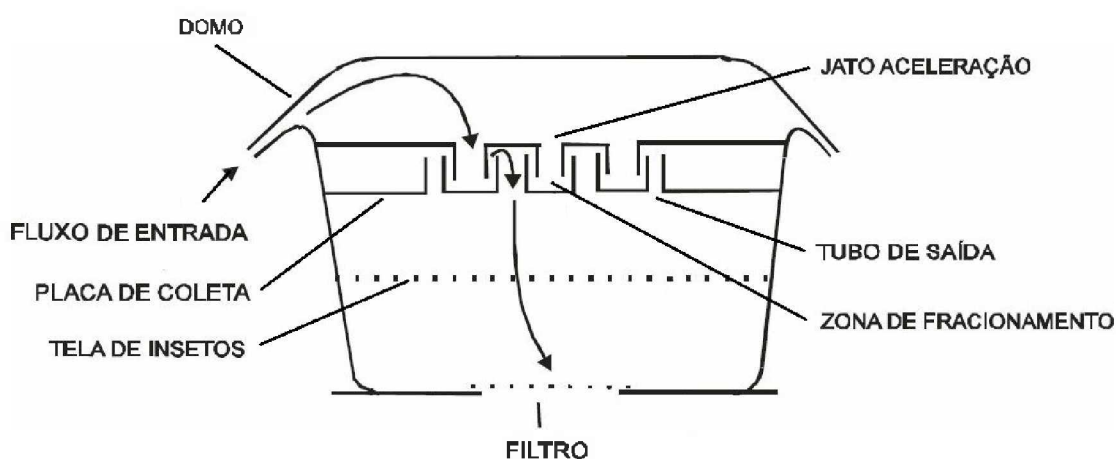
Figura 24 - Esquema interno do AGV-MP10.



Fonte: Energética (2016b), Figura 2.1, p. 4.

A cabeça de separação funciona da seguinte forma: o ar é sugado pelo motoaspirador até o compartimento imediatamente abaixo do domo; dali ele é conduzido através de jatos de aceleração até uma zona de fracionamento, onde as partículas maiores que 10 µm são retidas em uma placa de coleta; as partículas menores são conduzidas por tubos de saída até a parte inferior da cabeça e, em seguida, até o filtro coletor (Figura 25).

Figura 25 - Esquema interno da cabeça de separação do AGV-MP10.



Fonte: Energética (2016b), Figura 3.2 adaptada, p. 12.

O Quadro 2 mostra os principais dados técnicos do AGV-MP10.

Quadro 2 - Principais dados técnicos do AGV-MP10

Faixa de vazão	1,13 ± 10% m ³ /min
Motosaspirador	Dois estágios, refrigeração direta, 120V, 60 Hz, monofásico, 934W, 7,9A, 23.950 rpm
Porta-filtro	Para filtros de 203 mm x 254 mm
Registrador de eventos	Transdutor de pressão, giro 24 h, carta circular de 102 mm
Programador de tempo	Digital, resolução de 1 segundo, com programação semanal
Horâmetro	Eletromecânico, resolução de 1/100 h
Dimensões (base)	115 cm x 38 cm x 38 cm (A x L x P) Altura total com cabeça: 162 cm
Peso	Base: 35 kg; Cabeça: 26 kg; Total: 61 kg.

Fonte: Energética (2016b), Tabela 3.1, p. 11.

3.3 MATERIAL DE CONSUMO

3.3.1 Filtro de fibra de vidro

O filtro de fibra de vidro é o principal material de consumo utilizado nas medições de PTS e MP₁₀. Durante as amostragens, ele tem a função de reter as partículas, enquanto permite a passagem do ar. Foram utilizados filtros da marca Whatman, modelo GFA8X10IN. Possui dimensões de 203 x 254 x 0,26 mm e massa aproximada de 2,73 gramas. Com a porosidade nominal inferior a 1 µm, apresenta 99,9% de eficiência de coleta de partículas com diâmetro aerodinâmico maior que 0,3 µm. Ele é compatível com o amostrador de grandes volumes tanto de PTS quanto de MP₁₀. O Quadro 3 mostra suas características principais.

Quadro 3 - Principais características dos filtros de fibra de vidro

Características gerais	Monitoramento da qualidade do ar, onde se deseja apenas determinar a concentração total de particulados e aerossóis na atmosfera, e para a determinação de emissões em chaminés
Modelo e tamanho	GFA8X10IN – Folha retangular, de 203 x 254 mm, utilizada nos Amostradores de Grande Volume (PTS, MP ₁₀ ou MP _{2,5})
Material do filtro	Filtro borossilicato sem aglutinantes
Porosidade nominal	<1 µm
Espessura	0,26 mm
Perda de carga	46,6 cmH ₂ O (a 1,13 m ³ /min)
Máxima resistência à temperatura	540 °C
Eficiência de coleta	99,9% – medida pela retenção de partículas de DOP (ftalato de dioctila), com diâmetro acima de 0,3 µm (teste ASTM-2986)
Peso da folha	2,73 g (203 x 254 mm)

Fonte: Energética (2016a), Figura 5.1, p. 44.

A Figura 26 mostra um filtro novo instalado no AGV-PTS e no AGV-MP10. Cada medição dura 24 horas (em conformidade com o estabelecido na Resolução Conama

n° 491/2018, Anexo I), sendo realizada em intervalos de três dias, requerendo um novo filtro a cada amostragem.

Figura 26 - Filtros novos instalados nos amostradores de grandes volumes.



Fonte: autor (2021).

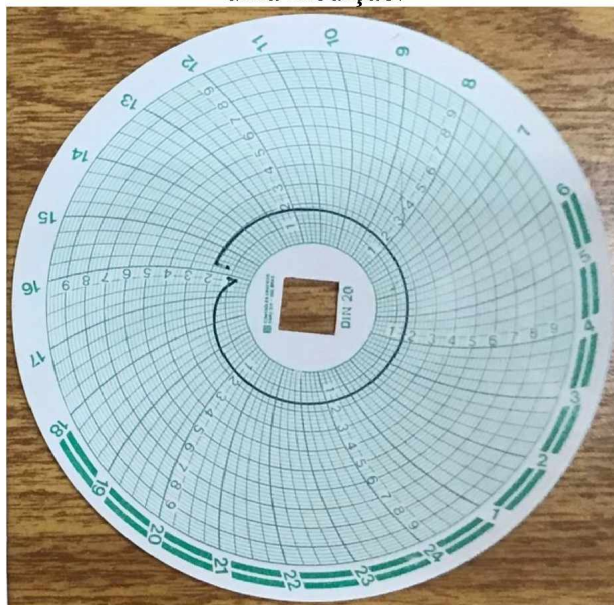
3.3.2 Carta gráfica

A carta gráfica utilizada no registrador dos amostradores de grandes volumes, marca Energética, modelo DIN20E, é circular, com 102 mm de diâmetro e furo central (quadrado para o AGV-PTS e redondo para o AGV-MP10). Possui uma graduação radial que vai de zero (mais próximo ao centro) até 10 (na extremidade), representando um valor proporcional à pressão do ar na saída do filtro. Ao longo do círculo maior, a carta possui uma segunda graduação que vai de 1 a 24, representando as horas do dia.

No início da amostragem, a carta é posicionada fazendo-se a marcação circular coincidir com a hora inicial da medição. A pena em cor preta é pressionada contra o papel, iniciando o registro gráfico na carta. Ao longo de 24 horas, a carta realiza um movimento completo de 360°, registrando as oscilações de pressão ocorridas durante toda a amostragem. Essa medição auxilia o cálculo preciso da vazão de ar.

A Figura 27 mostra um exemplo de carta gráfica utilizada em uma medição.

Figura 27 - Exemplo de carta gráfica usada em uma medição.



Fonte: autor (2021).

3.4 EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO

O Laboratório de Sistemas Particulados da Universidade Federal de Uberlândia foi utilizado como apoio para a preparação e medição dos filtros antes e depois das campanhas de monitoramento.

Os equipamentos de laboratório utilizados foram:

- Estufa para secagem;
- Caixa de secagem;
- Balança de precisão.

3.4.1 Estufa para secagem

Uma estufa para secagem e esterilização, marca Marconi, modelo MA 033, foi utilizada para regeneração de sílica gel. Uma bandeja com dimensões aproximadas de 30 x

20 cm, contendo cerca de 500 gramas de sílica gel, era mantida no interior da estufa a 105°C por 24 horas para garantir que o material ficasse totalmente seco (Figura 28).

Figura 28 - Estufa utilizada para regeneração de sílica gel.



Fonte: Marconi (2021) e autor (2021).

3.4.2 Caixa de secagem

Uma caixa foi construída para promover a secagem tanto dos filtros novos, quanto dos usados, visando garantir que eles estivessem desprovidos de umidade no momento da pesagem. A caixa de madeira possui um compartimento para apoiar a bandeja contendo a sílica gel, além de sete bandejas de suporte para os filtros, como mostrado na Figura 29.

Primeiro, a bandeja contendo a sílica gel, recém-removida da estufa, era posicionada na base da caixa. Em seguida, os filtros (novos ou usados) eram posicionados em seus compartimentos individuais e a porta da caixa era fechada. Os filtros permaneciam secando por 24 horas para então ficarem prontos para a próxima etapa, de pesagem.

Figura 29 - Caixa de madeira utilizada para secagem dos filtros.

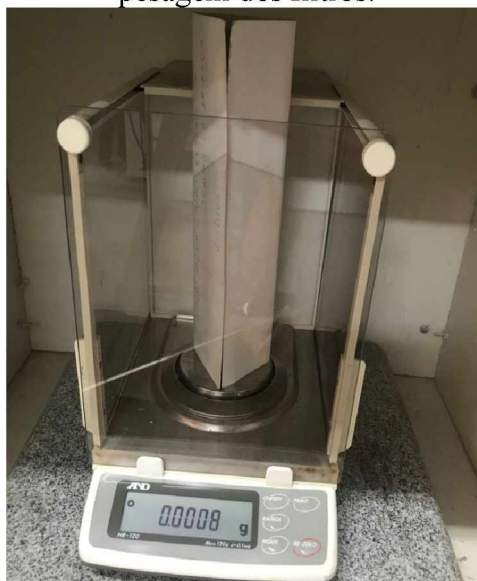


Fonte: autor (2021).

3.4.3 Balança de precisão

Para realizar a pesagem dos filtros, foi utilizada uma balança de precisão, marca A&D Weighing, modelo HR-120 (Figura 30). A balança possui capacidade de 120 gramas e resolução de 0,0001 grama. O Quadro 4 mostra suas principais especificações (A&D, [s.d.]).

Figura 30 - Balança utilizada para pesagem dos filtros.



Fonte: autor (2021).

Após os filtros terem permanecido por 24 horas dentro da caixa de secagem na presença de sílica gel para remoção de umidade, eles eram pesados na balança. A massa do filtro novo era anotada em uma planilha onde, posteriormente, seria anotada também a massa do filtro usado (após também passar pela etapa de secagem descrita anteriormente). A diferença entre a massa do filtro usado e a do novo representa a massa do material particulado que foi retida durante a operação de amostragem.

Quadro 4 - Principais características da balança de precisão HR-120

Capacidade de pesagem	120 g
Indicação mínima de medição	0,1 g
Unidade mínima de medida (precisão)	0,1 mg
Repetibilidade (desvio-padrão)	0,1 mg
Linearidade	±0,2 mg
Tempo de estabilização	2,5 segundos
Taxa de atualização do indicador	5 a 10 vezes por segundo
Massa de calibração	50 a 100 g
Condições de operação	5 a 40° C, < 85% HR

Fonte: A&D [s.d.], p. 34.

3.5 OPERAÇÃO DE AMOSTRAGEM DE PTS E MP₁₀

Após terem sido pesados em laboratório, os filtros de fibra de vidro eram acondicionados em sacolas plásticas individuais estéreis e transportados até o local de amostragem (Terminal Central de ônibus de Uberlândia-MG). Cada filtro era instalado em um amostrador de grandes volumes, sendo um no AGV-PTS e outro no AGV-MP10 (Figura 26). Uma nova carta gráfica era posicionada no registrador de eventos e o valor inicial registrado no horômetro (Figura 23) era anotado em uma planilha.

Cada AGV tinha a fonte de alimentação conectada a um *timer* individual, o qual era programado para fornecer energia ao equipamento por exatamente 24 horas.

Quando o motor era acionado, o motoaspirador iniciava o processo de sucção do ar atmosférico, forçando a passagem do ar pelo filtro, o qual fazia a retenção do material

particulado (PTS ou MP₁₀, dependendo do equipamento). O horômetro iniciava a contagem de tempo, enquanto o registrador de eventos iniciava a marcação na carta gráfica, a qual deveria dar uma volta completa durante o período da amostragem.

Passadas 24 horas, por ação do *timer*, o motor era automaticamente desligado. O valor final registrado no horômetro era anotado na planilha. Os filtros e as cartas gráficas usados na amostragem eram então removidos dos equipamentos, novamente acondicionados em suas respectivas sacolas plásticas e levados de volta ao laboratório, onde os filtros seriam novamente secos e pesados, conforme procedimento descrito anteriormente. O valor da massa final do filtro era anotado em uma planilha.

3.6 CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE PTS E MP₁₀

A concentração de material particulado em suspensão, seja PTS ou MP₁₀, expressa em µg/m³, pode ser calculada pela relação entre a massa retida no filtro e o volume de ar que o atravessou (Equação 3.1) (Lira, 2009).

$$Conc. = (10^6) \frac{(M_f - M_i)}{V_p} \quad (3.1)$$

sendo:

M_f – massa final do filtro, após a amostragem, g;

M_i – massa inicial do filtro, antes da amostragem, g;

V_p – volume padrão total do ar amostrado, m³;

(10⁶) – fator de conversão de unidade, µg/g.

A massa do filtro antes e depois da amostragem era determinada por meio de pesagem em laboratório, conforme procedimento descrito anteriormente. Já o volume padrão pode ser calculado conforme a Equação 3.2.

$$V_p = \bar{Q}_p t \quad (3.2)$$

sendo:

\bar{Q}_p – vazão volumétrica padrão média, m³/min;

t – tempo total de amostragem, min.

O tempo total de amostragem, programado para ser de 24 horas, era conferido na marcação do horômetro, para garantir maior precisão da medida.

É natural que a pressão e a temperatura ambientes variem durante a amostragem, o que provocaria uma alteração na vazão de ar pelo motoaspirador, já que este opera em rotação constante. Por isso, a vazão volumétrica era ajustada conforme as condições ambientais no momento das amostragens, de acordo com as Equações 3.3, 3.4 e 3.5.

$$\bar{Q}_p = \bar{Q}_a \left(\frac{P_m}{760 \text{ mmHg}} \right) \left(\frac{298 \text{ K}}{T_m} \right) \quad (3.3)$$

$$\bar{Q}_a = \frac{1}{a_2} \left(\frac{\bar{P}_0}{P_m} - b_2 \right) \sqrt{T_m} \quad (3.4)$$

$$\bar{P}_0 = P_m - \overline{dH}_f \quad (3.5)$$

sendo:

\bar{Q}_a – vazão volumétrica real, m³/min;

P_m – pressão ambiente média durante o período de amostragem, mmHg;

T_m – temperatura ambiente média durante o período de amostragem, K;

\bar{P}_0 – pressão de estagnação absoluta média durante o período de amostragem, mmHg;

a_2 – parâmetro obtido pela inclinação da relação de calibração do amostrador;

b_2 – parâmetro obtido pela interseção da relação de calibração do amostrador;

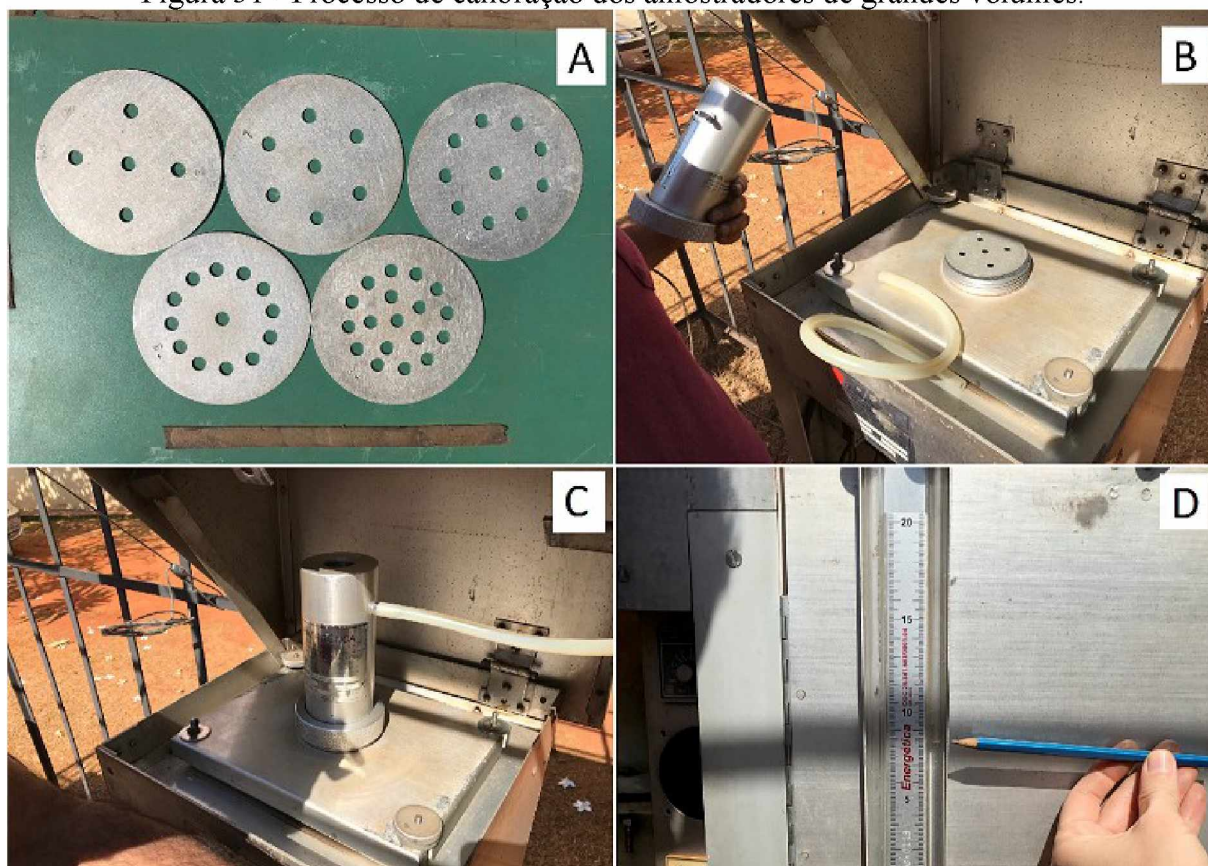
\overline{dH}_f – média aritmética das pressões diferenciais através do filtro do início e do fim da amostragem.

Os dados de pressão e temperatura ambiente média horária, referentes a todo o período da amostragem, eram obtidos por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021). As informações coletadas na estação meteorológica de Uberlândia-MG (Figura 20) são automaticamente enviadas ao servidor do Inmet e disponibilizadas aos usuários em tempo real.

Os parâmetros a_2 e b_2 são obtidos por meio da calibração dos amostradores de grandes volumes. Esse procedimento é idealmente realizado a cada seis meses, após a substituição das escovas do motoaspirador, após uma eventual relocação do equipamento ou em virtude de algum aparente descontrole de processo. A calibração consiste em variar a vazão de ar do AGV (por meio do uso de placas com diferentes números de orifícios), fazendo-se a respectiva leitura da diferença de pressão gerada pelo equipamento e deflexão na carta gráfica em cada caso.

A Figura 31 mostra as cinco placas utilizadas no processo, contendo 5, 7, 10, 13 e 18 orifícios (A). Uma placa de cada vez é posicionada no local onde se acopla o filtro durante o procedimento de operação (B). A entrada de ar é conectada a uma mangueira que leva a um manômetro de coluna d'água (C). Para cada placa, anota-se o valor da pressão registrada no manômetro (D) e a deflexão registrada na carta gráfica.

Figura 31 - Processo de calibração dos amostradores de grandes volumes.



Fonte: autor (2021).

A média aritmética das pressões diferenciais através do filtro ($\overline{dH_f}$) é calculada pela leitura da deflexão registrada na carta gráfica durante a amostragem, no intervalo de duas em duas horas, totalizando 12 leituras durante as 24 horas de operação.

Para facilitar o cálculo da concentração dos poluentes, para cada medição realizada, as variáveis citadas nas Equações 3.1 a 3.5 eram lançadas em uma planilha, obtendo-se automaticamente o resultado da concentração de particulado (PTS ou MP_{10}), expressa em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nas condições padrão (25°C e 760 mmHg).

3.7 MEDIDOR DE OZÔNIO

O equipamento utilizado para fazer as medições de concentração de ozônio no ar atmosférico é apresentado na Figura 32. Trata-se de um monitor de qualidade do ar portátil da marca Aeroqual, série 200. A base do monitor é uma plataforma eletrônica com um visor e botões para operação. O sensor acoplado ao topo é a parte do equipamento que faz a sucção do ar e leitura da concentração de um poluente específico – nesse caso, o ozônio. O sensor é do tipo semicondutor sensível a gás (GSS) e apresenta as características listadas no Quadro 5 (AEROQUAL, [s.d.]).

Figura 32 - Medidor de ozônio Aeroqual, série 200.



Fonte: autor (2021).

Quadro 5 - Principais características do medidor de ozônio portátil Aeroqual, série 200

Funções de leitura	Instantânea, mínima, máxima, média
Condições ambientais de operação	Temperatura: 0°C a 40°C; Umidade: 10 a 90%
Dimensões	195 x 122 x 54 mm (A x L x P)
Peso	< 460g
Unidades de medição de gás	ppm ou mg/m ³
Faixa de operação	0 a 0,15 ppm
Limite mínimo de detecção	0,001 ppm
Precisão de calibração de fábrica	< ± 0,005 ppm
Tempo de resposta	60 segundos

Fonte: Aeroqual, [s.d.], p. 17.

Durante a amostragem, o equipamento ficava suportado em um tripé para se manter em posição estável a uma altura superior a um metro de distância do solo (Figura 33).

Figura 33 - Medidor de ozônio apoiado em tripé durante amostragem.



Fonte: autor (2021).

Ao ser ligado, o equipamento realizava uma calibração automática por cerca de três minutos antes de iniciar as medições. Após esse período, iniciava-se a medição da concentração de ozônio. Cada medição levava em média um minuto. O visor do equipamento apresentava as seguintes informações: medição instantânea, valor mínimo, valor máximo e média dos valores registrados no período. Cada valor instantâneo era anotado em uma planilha. Ao todo eram realizadas 60 medições em uma hora. A média horária era então calculada pela média aritmética das 60 medições instantâneas.

3.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

3.8.1 Diagrama *Box Plot*

Os gráficos do tipo *box plot* são amplamente utilizados em análises estatísticas por apresentarem um amplo leque de informações de determinada amostra, como posição, dispersão, assimetria, caudas e dados discrepantes (MORETTIN; BUSSAB, 2017).

O diagrama é composto por um retângulo central, duas hastes verticais (uma na parte superior e outra na parte inferior), além de pontos exteriores. Para construir o diagrama, inicialmente é necessário calcular os quartis da amostra em análise:

- o 2º quartil (também conhecido como mediana, q_2 ou $q(0,50)$) é o valor central, o qual deixa metade dos dados abaixo dela e metade acima, quando há um número ímpar de dados. Quando a amostra tem um número par de dados, a mediana é calculada pela média entre os dois valores centrais;
- o 1º quartil (25º percentil, q_1 ou $q(0,25)$) é o valor que divide em duas partes a metade inferior dos dados;
- o 3º quartil (75º percentil, q_3 ou $q(0,75)$) é o valor que divide em duas partes a metade superior dos dados.

Em seguida, calcula-se a distância interquartil (d_q), definida como a diferença entre o terceiro e o primeiro quartis (equação 3.6):

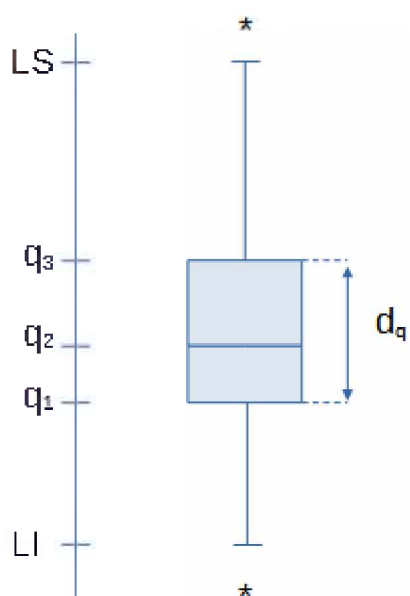
$$d_q = q_3 - q_1 \quad (3.6)$$

Por último, calculam-se os limites superior (LS) e inferior (LI), definidos conforme as equações 3.7 e 3.8.

$$LS = q_3 + (1,5)d_q \quad (3.7)$$

$$LI = q_1 - (1,5)d_q \quad (3.8)$$

Figura 34 - Exemplo de diagrama *box plot* típico.



Fonte: adaptado de Morettin e Bussab (2017), Figura 3.4.

A Figura 34 mostra um exemplo de diagrama *box plot* típico. O retângulo central possui três linhas horizontais, representando os quartis: q_1 na parte inferior, q_2 no centro e q_3 na parte superior. As hastes verticais posicionadas acima e abaixo do retângulo delimitam os limites inferior e superior da amostra. Todos os valores compreendidos entre esses limites são chamados de “valores adjacentes”. As observações acima do LS ou abaixo do LI são chamadas de “pontos exteriores” e representadas por asteriscos. Quando esses pontos exteriores são produto de erro de observação ou de arredondamento, eles são chamados de “valores atípicos” ou “*outliers*”.

A representação da média amostral no gráfico do tipo *box plot* é opcional, porém comumente utilizada, representada por uma linha interligando os retângulos do gráfico.

3.8.2 Correlação

Os coeficientes de associação ou correlação quantificam o grau de associação entre duas variáveis. A associação (ou dependência) entre essas variáveis pode ser descrita por meio de um único coeficiente, que varia entre -1 e +1 (MORETTIN; BUSSAB, 2017). Quanto mais próxima de zero, mais fraca é a correlação entre duas variáveis. E quanto mais próxima de +1 ou de -1, mais forte é a correlação de forma direta ou inversa, respectivamente. O Quadro 6 mostra as faixas de correlação e a interpretação dada a cada uma delas.

Quadro 6 - Referência para interpretação do coeficiente de correlação

Correlação calculada	Interpretação
0,90 a 1,00 (ou -0,90 a -1,00)	Correlação muito forte
0,70 a 0,90 (ou -0,70 a -0,90)	Correlação forte
0,50 a 0,70 (ou -0,50 a -0,70)	Correlação moderada
0,30 a 0,50 (ou -0,30 a -0,50)	Correlação fraca
0,00 a 0,30 (ou -0,00 a -0,30)	Correlação desprezível

Fonte: (MUKAKA, 2012).

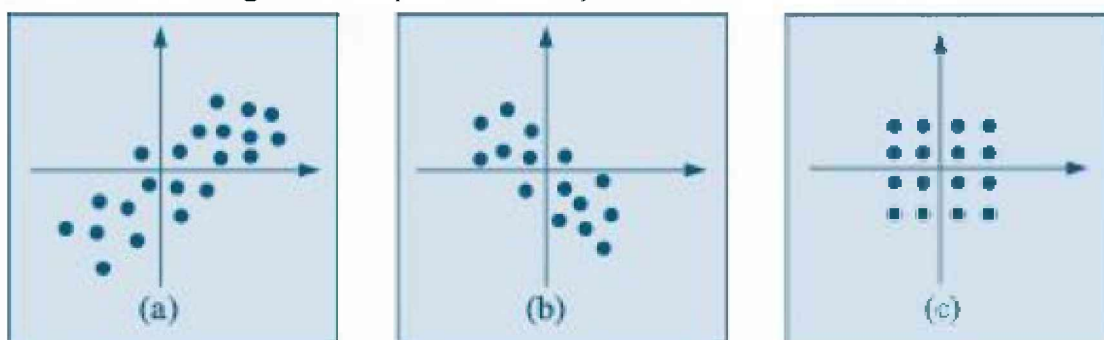
Quando se trata de um conjunto de dados de duas variáveis quantitativas, utiliza-se um gráfico de dispersão. A representação gráfica das variáveis auxilia a compreensão do comportamento de duas variáveis quanto à existência ou não de correlação entre elas.

A Figura 35 apresenta três exemplos de diferentes tipos de associação que podem ocorrer entre duas variáveis. No gráfico de dispersão (a), a maioria dos pontos se localizam no primeiro e no terceiro quadrantes. Observa-se uma tendência de associação linear direta (ou positiva), já que a linha de tendência é crescente. A soma do produto das coordenadas dos pontos trará um resultado positivo, portanto, a correlação entre as variáveis também é positiva.

No gráfico de dispersão (b), a maioria dos pontos está no segundo e quarto quadrantes; a associação linear é inversa (ou negativa); a soma do produto das coordenadas dos pontos será negativa, bem como a correlação entre as variáveis.

Finalmente, no gráfico de dispersão (c), os pontos estão igualmente distribuídos entre os quatro quadrantes. A soma dos produtos das coordenadas será próximo de zero, assim como a correlação entre as variáveis. Nesse caso, não há correlação linear entre as variáveis.

Figura 35 - Tipos de associações entre duas variáveis.



Fonte: Morettin e Bussab (2017), Figura 4.6.

Matematicamente, a correlação é calculada por meio fórmula apresentada na equação 3.9.

$$\text{corr}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{dp(X)} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{dp(Y)} \right) \quad (3.9)$$

sendo:

n – número de observações;

x_i e y_i – os n valores das variáveis x e y ;

\bar{x} e \bar{y} – média dos n valores das variáveis x e y ;

$dp(X)$ e $dp(Y)$ – desvio padrão do conjunto de variáveis de x e y .

3.8.3 Dados atmosféricos

A página eletrônica do Inmet fornece dados históricos e dados em tempo real de centenas de estações meteorológicas do país (INMET, 2021). Os dados de Uberlândia-MG (código A507) se referem à estação instalada nas dependências do Campus Santa Mônica da UFU – a localização exata é mostrada na Figura 20. Após selecionar a estação e o período de interesse (limitado ao intervalo de seis meses), o sistema gera uma tabela com informações referentes às seguintes variáveis independentes (Figura 36):

- Temperatura (°C) – instantânea, máxima e mínima;
- Umidade (%) – instantânea, máxima e mínima;
- Ponto de orvalho (°C) – instantâneo, máximo e mínimo;

- Pressão (hPa) – instantânea, máxima e mínima;
- Vento (m/s) – velocidade, direção e rajada;
- Radiação (kJ/m²);
- Precipitação de chuva (mm).

Figura 36 - Exemplo de dados meteorológicos de Uberlândia-MG disponibilizados no servidor do Inmet.

ABRIR / FECHAR		INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA																
Estação: UBERLÂNDIA (A507)																		
Download CSV																		
Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação KJ/m ²	Chuva mm
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.		
01/07/2021	0000	11,8	12,7	11,7	38,0	39,0	35,0	-2,1	-2,0	-2,6	922,4	922,5	922,1	1,8	171,0	5,4	0,0	
01/07/2021	0100	10,7	11,8	10,7	43,0	43,0	38,0	-1,4	-1,4	-2,2	922,9	922,9	922,4	1,0	160,0	4,9	0,0	
01/07/2021	0200	10,2	10,8	10,2	44,0	45,0	43,0	-1,5	-1,1	-1,5	922,8	922,9	922,7	0,5	167,0	3,9	0,0	
01/07/2021	0300	10,0	10,2	9,9	42,0	45,0	42,0	-2,3	-1,4	-2,3	922,6	922,8	922,5	0,7	174,0	2,8	0,0	
01/07/2021	0400	10,0	10,3	9,8	43,0	43,0	41,0	-2,1	-2,1	-2,5	922,4	922,7	922,4	1,4	140,0	4,2	0,0	
01/07/2021	0500	9,5	10,0	9,4	46,0	46,0	42,0	-1,5	-1,5	-2,2	921,9	922,4	921,9	1,6	138,0	4,6	0,0	
01/07/2021	0600	9,8	9,8	8,9	45,0	49,0	45,0	-1,6	-1,3	-1,7	921,6	921,9	921,5	1,0	126,0	4,0	0,0	
01/07/2021	0700	9,0	10,0	9,0	49,0	49,0	44,0	-1,3	-1,3	-1,7	921,6	921,7	921,4	0,8	143,0	3,3	0,0	
01/07/2021	0800	8,2	9,0	7,9	52,0	53,0	48,0	-1,1	-1,0	-1,5	921,6	921,7	921,5	0,6	117,0	3,7	0,0	

Fonte: Inmet (2021).

As informações são fornecidas de hora em hora. Portanto, em um mês de 30 dias são disponibilizadas 720 medições de cada variável independente listada anteriormente. A página eletrônica tem uma funcionalidade que permite o *download* da planilha completa no formato “CSV”.

A estação de Uberlândia-MG foi instalada em 18/12/2002. Porém, o primeiro registro de operação data de 21/3/2003. Assim, inicialmente, foram acessadas e baixadas todas as informações disponíveis para o período de interesse, ou seja, de março/2003 a julho/2021. Para facilitar o tratamento de dados, eles foram então reunidos em uma mesma planilha, a qual contou com mais de 160.000 linhas de dados horários.

No caso da variável independente “precipitação de chuvas”, o total mensal foi obtido pela soma de todos os registros horários de um mesmo mês. Para as demais variáveis (temperatura, umidade, pressão, velocidade do vento e radiação), calculou-se a média dos registros horários do mês.

Nos períodos em que a estação não esteve em funcionamento, normalmente por problemas técnicos, a planilha do Inmet não apresentava informação sobre aquele dado, ou seja, a célula ficava em branco. Para se calcular o período mensal de funcionamento da

estação, foi dividido o total de horas em que as informações estavam disponíveis pelas horas totais do mês.

Como as condições meteorológicas seguem oscilações periódicas anuais, para cada variável independente, foi calculada a média de cada mês dentro do período de interesse (2003 a 2021). Por exemplo, os resultados médios dos meses de janeiro de todos os anos em que esse dado estava disponível foram comparados entre si. O mesmo ocorreu para todos os meses até dezembro.

De posse dessas informações, para cada variável independente, foi realizada uma análise estatística por gráfico *box plot*. Como discutido anteriormente, esse tipo de gráfico apresenta o intervalo dos 50% de valores centrais, a mediana, a amplitude e os valores anômalos, também conhecidos como *outliers*. Também foi calculada a média dos valores de cada mês e essa informação foi apresentada no mesmo gráfico como uma linha.

3.8.4 Concentração dos poluentes

A revisão bibliográfica dos estudos do ar atmosférico realizados em Uberlândia-MG permitiu o levantamento de informações referentes à concentração de PTS e MP₁₀ entre os anos de 2003 e 2018. Como essas variáveis sofrem oscilações periódicas anuais – de modo semelhante aos dados meteorológicos –, também optou-se por realizar uma análise estatística por gráfico *box plot* da concentração de PTS e MP₁₀ ao longo desse período.

Inicialmente, plotou-se o gráfico com todas as informações disponíveis, no intuito de se identificar possíveis *outliers*. O próximo passo foi eliminar os *outliers* da base de dados, visando obter-se uma amostra mais confiável. No gráfico final, também foi apresentada a média dos valores de cada mês.

Após concluída essa etapa de exclusão dos *outliers* e cálculo da média de concentração de PTS e MP₁₀ em cada mês do ano entre 2003 e 2018, o próximo passo foi a comparação dessa média com os resultados medidos entre 2020 e 2021, durante o período mais restritivo da pandemia de Covid-19.

Para o poluente ozônio, por ausência de registros históricos, o gráfico *box plot* foi desenvolvido apenas com os dados disponíveis entre outubro/2017 e setembro/2021.

No intuito de verificar o quanto cada variável independente meteorológica influencia na concentração dos poluentes, foi também realizada uma análise de correlação entre todas essas variáveis. O mesmo cálculo foi realizado entre a média mensal de novos casos diários de Covid-19 no Brasil e a concentração dos poluentes.

4.1 DADOS METEOROLÓGICOS DE UBERLÂNDIA-MG

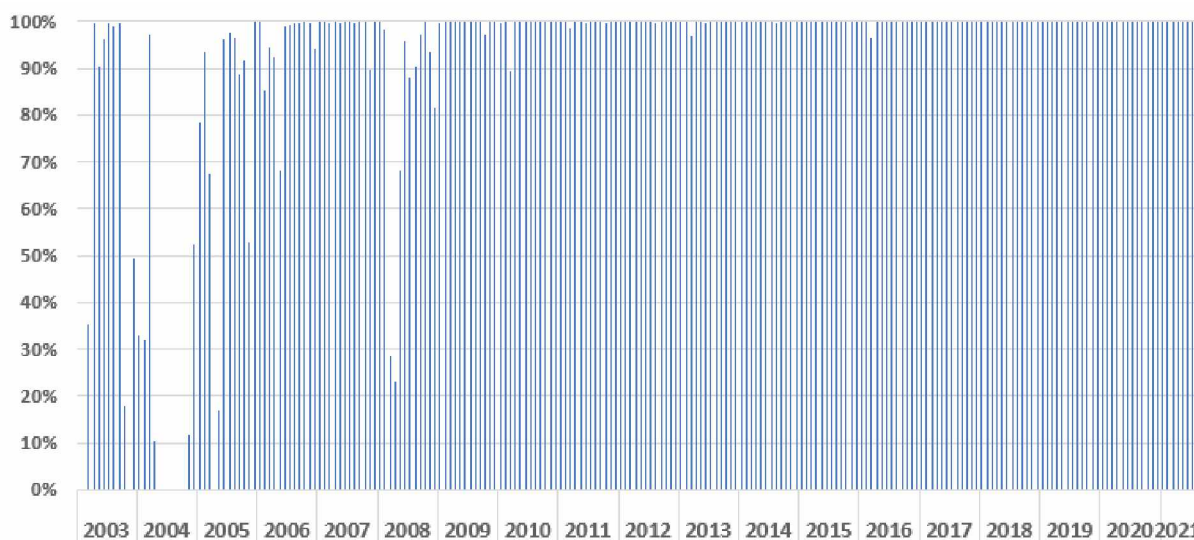
Conforme discutido anteriormente, as variáveis meteorológicas que apresentaram maior correlação com a concentração de materiais particulados no ar atmosférico de Uberlândia-MG foram a precipitação e a umidade relativa do ar (LIMA, 2007; LIRA, 2009; FERNANDES, 2013; e SILVA, 2018). Além dessas, outras variáveis também foram citadas como possíveis influências, como nebulosidade, insolação, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar.

Assim, optou-se por pesquisar as seguintes variáveis independentes disponíveis na página eletrônica do Inmet referentes à estação meteorológica de Uberlândia-MG (código A507): precipitação total (mm), umidade relativa do ar instantânea (%), temperatura do ar instantânea (°C), pressão atmosférica instantânea (hPa), velocidade do vento (m/s) e radiação global (kJ/m²).

4.1.1 Período de operação da estação meteorológica

A Figura 37 mostra o período de funcionamento da estação meteorológica de Uberlândia-MG entre março/2003 e julho/2021.

Figura 37 - Período de funcionamento da estação meteorológica de Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.



Fonte: Inmet (2021).

Nos anos iniciais, a estação operou de maneira descontínua, sobretudo entre outubro de 2003 e maio de 2006. Inclusive, no ano de 2004, a estação ficou totalmente inoperante por mais de sete meses consecutivos (entre 4 de abril e 23 de novembro).

Posteriormente, em 2008, a estação voltou a apresentar instabilidade, ficando inoperante, em média, em 20% do período desse ano específico.

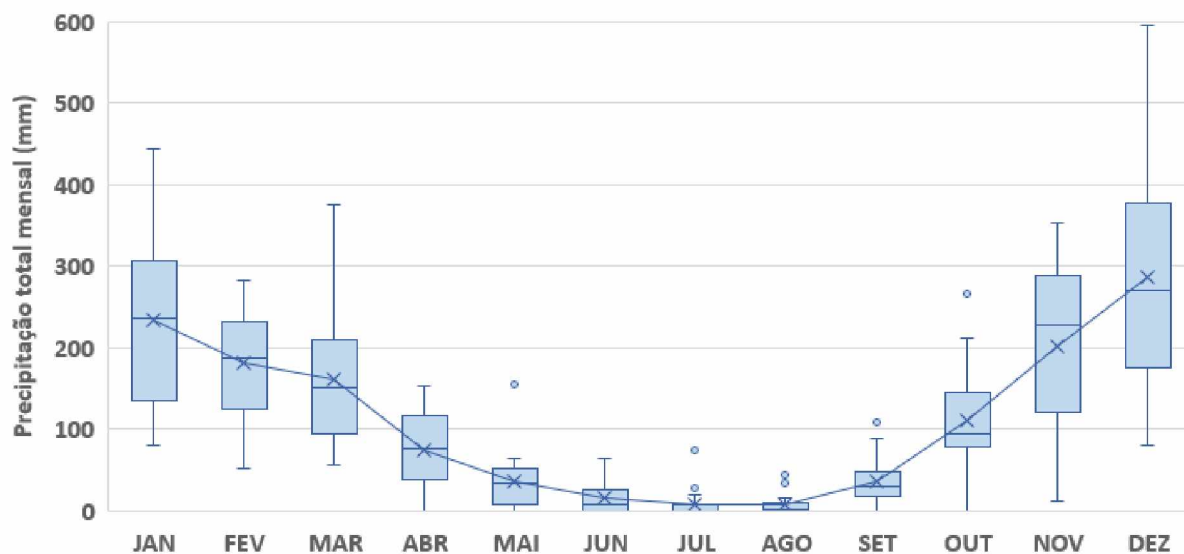
De 2009 em diante, a estação passou a funcionar de maneira bastante estável, operando entre 99% e 100% dos períodos anuais².

4.1.2 Precipitação de chuva

A Figura 38 mostra o perfil de precipitação de chuva em Uberlândia-MG, conforme registros entre março/2003 e julho/2021.

² A única exceção foi o parâmetro “precipitação de chuvas”, para o qual o banco de dados do Inmet não apresentou registros referentes a todo o mês de maio/2020.

Figura 38 - Perfil de precipitação de chuva total mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.



Fonte: Inmet (2021).

Para exemplificar, o gráfico da Figura 38 nos mostra que, entre 2003 e 2021, o mês de janeiro registrou precipitações de chuvas que variaram de 81,6 mm até 444 mm no mês. A precipitação média do mês de janeiro entre esses anos foi de 233,9 mm. Já o mês de fevereiro registrou uma precipitação total de chuvas mínima de 52 mm e máxima de 283,2 mm, entre 2003 e 2021, enquanto a precipitação média foi de 181,8 mm.

Em concordância com os dados da literatura, nota-se que o período mais seco do ano se concentra no inverno – de maneira mais acentuada entre os meses de junho e agosto, quando a precipitação total mensal é inferior a 15 mm de chuva, em média. Já o período mais chuvoso se estende desde meados da primavera até o final do verão – entre novembro e março, quando a precipitação total mensal fica, em média, entre 160 e 285 mm de chuva.

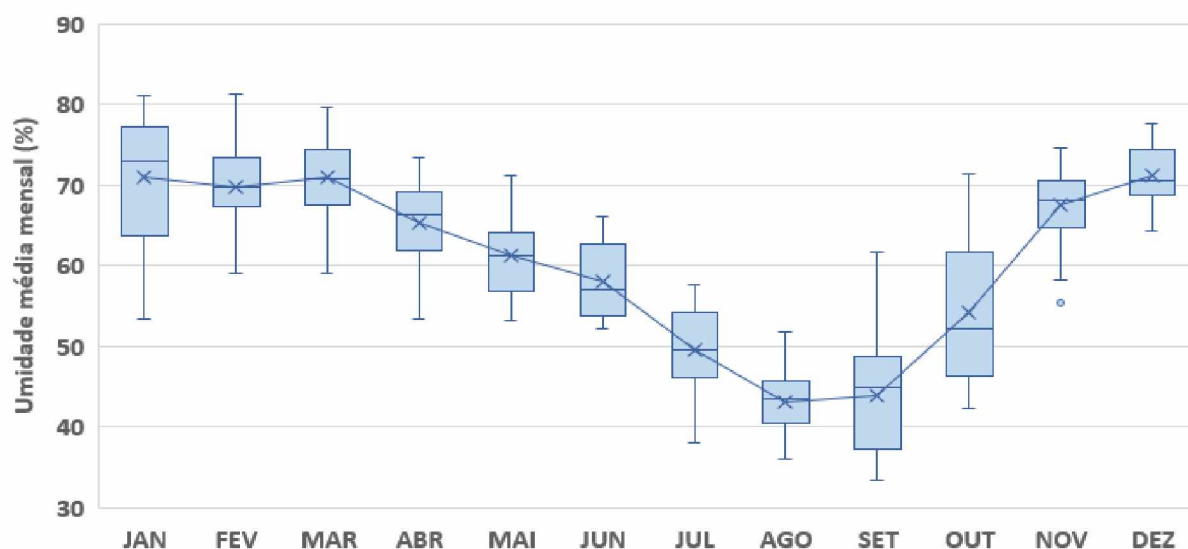
4.1.3 Umidade relativa do ar

A Figura 39 mostra o perfil de umidade relativa do ar atmosférico em Uberlândia-MG, conforme registros entre março/2003 e julho/2021.

Os meses mais secos do ano são agosto e setembro, coincidentes com o período final da estação de inverno. A umidade média mensal fica próxima de 43% nesse intervalo. Já os

meses mais úmidos são de novembro a março, de maneira condizente com o período de maior precipitação de chuvas. Nesse intervalo, a umidade média gira em torno de 70%.

Figura 39 - Perfil de umidade relativa do ar média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.



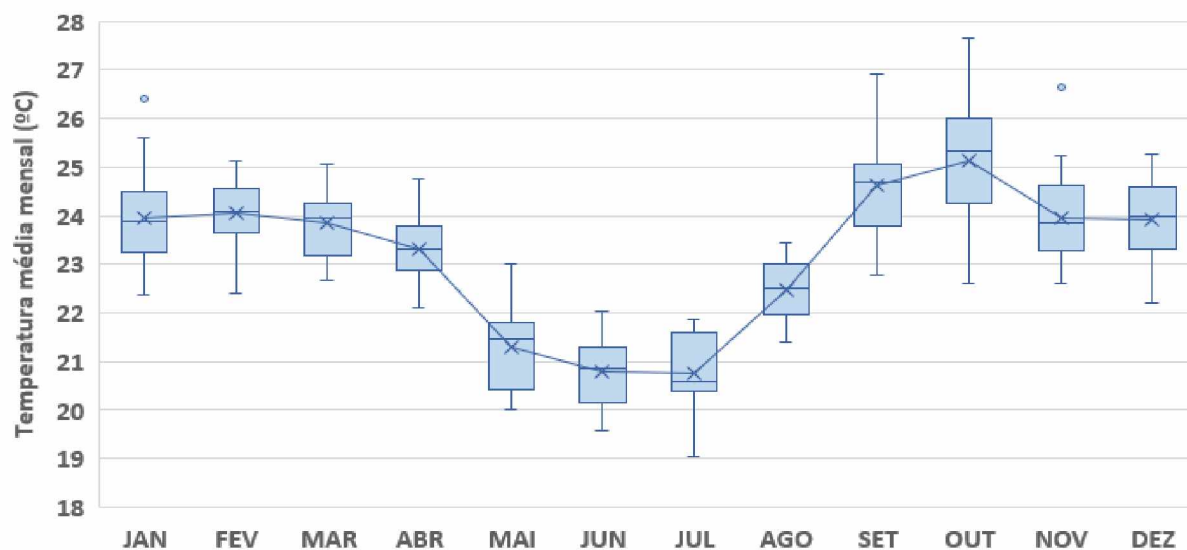
Fonte: Inmet (2021).

4.1.4 Temperatura do ar

A Figura 40 mostra o perfil de temperatura de bulbo seco do ar atmosférico em Uberlândia-MG, conforme registros entre março/2003 e julho/2021.

O período mais frio do ano coincide com o inverno. Os meses de junho e julho apresentam temperatura média inferior a 21°C. Porém as maiores temperatura não são registradas no verão. O mês mais quente do ano é outubro, em meados da primavera, quando a temperatura média supera os 25°C. Entre novembro e março, a temperatura média gira em torno de 24°C. Essa temperatura mais amena (no pico do verão) aparenta ter relação direta com o alto índice pluviométrico do período. Observa-se, portanto, um forte impacto das chuvas na redução da temperatura ambiente.

Figura 40 - Perfil de temperatura do ar média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.

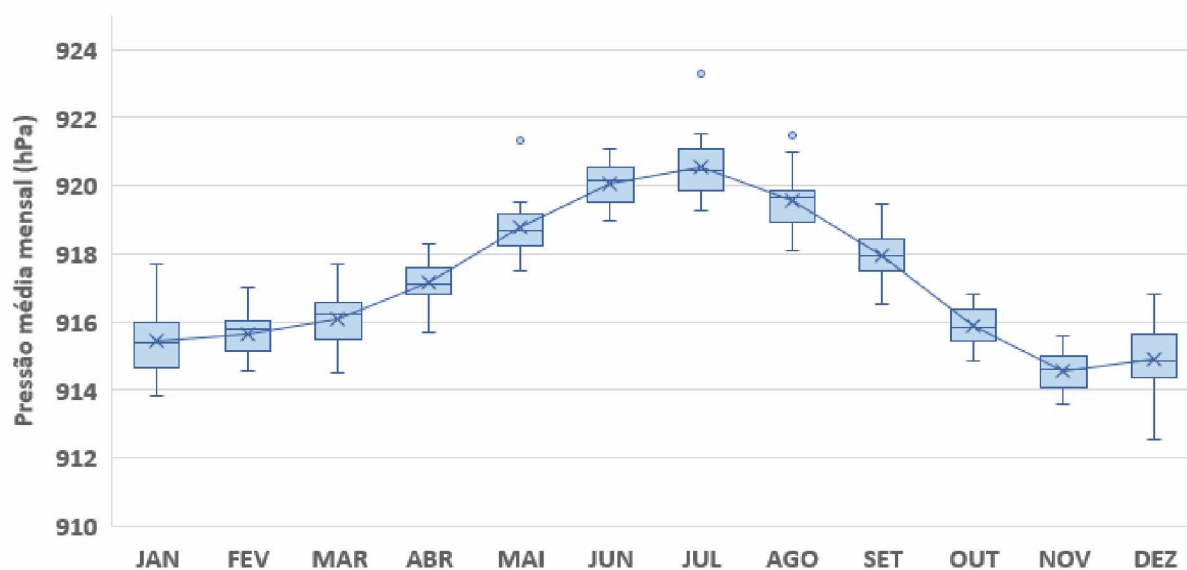


Fonte: Inmet (2021).

4.1.5 Pressão atmosférica

A Figura 41 mostra o perfil de pressão atmosférica em Uberlândia-MG, conforme registros entre março/2003 e julho/2021.

Figura 41 - Perfil de pressão atmosférica média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.



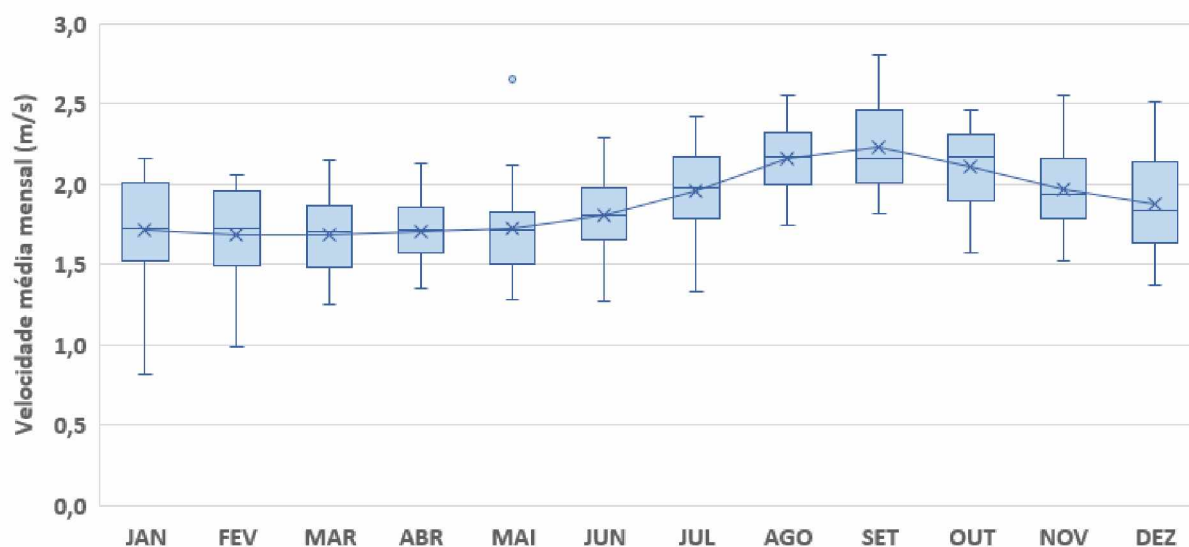
Fonte: Inmet (2021).

A pressão atmosférica média mensal apresenta um perfil inverso ao da temperatura, com máxima entre junho e julho e mínima entre novembro e dezembro. Essa correlação pode ser explicada pelo fato de que o ar mais frio (registrado no período do meio do ano) possui maior densidade, aumentando, portanto, a pressão atmosférica local. O ar mais quente (registrado no período final do ano) possui menor densidade, favorecendo o deslocamento ascendente do ar e reduzindo a pressão atmosférica local.

4.1.6 Velocidade do vento

A Figura 42 mostra o perfil de velocidade do vento em Uberlândia-MG, conforme registros entre março/2003 e julho/2021.

Figura 42 - Perfil de velocidade do vento média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.



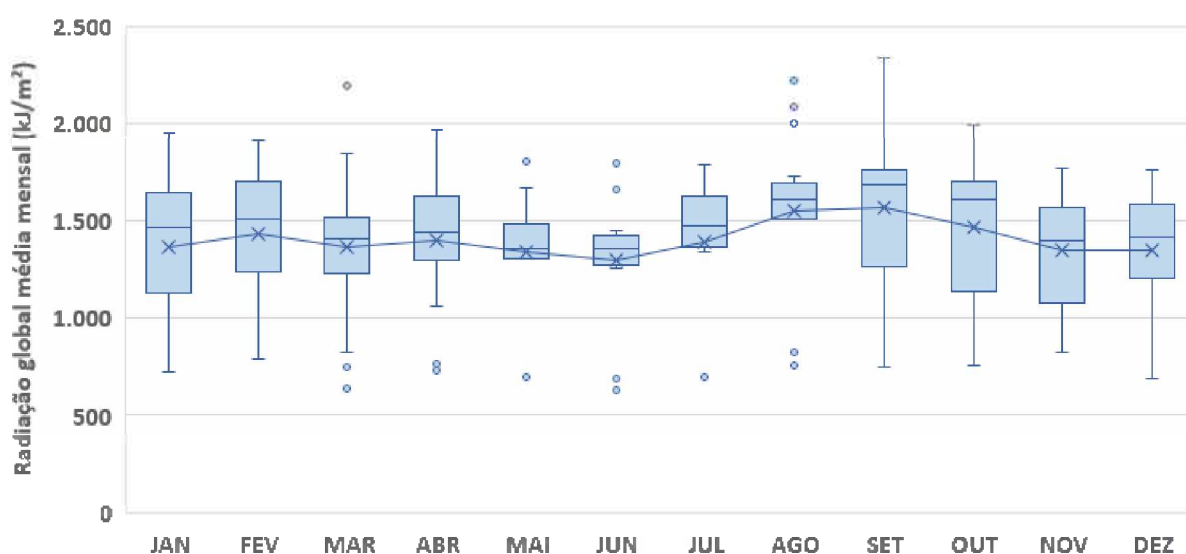
Fonte: Inmet (2021).

O perfil de velocidade do vento apresenta oscilações menores ao longo do ano, quando comparado com as demais variáveis meteorológicas já discutidas. A maior velocidade média ocorre em setembro (2,23 m/s). Já a menor velocidade ocorre entre os meses de janeiro e maio, com uma pequena variação média, que vai de 1,68 a 1,72 m/s.

4.1.7 Radiação solar

A Figura 43 mostra o perfil de radiação solar incidente em Uberlândia-MG, conforme registros entre março/2003 e julho/2021.

Figura 43 - Perfil de radiação solar média mensal em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021.



Fonte: Inmet (2021).

A radiação global é a variável independente que possui o perfil menos definido. As médias mensais oscilam ao longo do ano, apresentando os valores máximos entre agosto e setembro. É também a variável que apresenta o maior número de *outliers*, apresentando diversos pontos fora da curva entre os meses de março e agosto. Por esses motivos, concluiu-se que essa variável independente não é estatisticamente confiável no estudo de correlação entre os dados meteorológicos e as medições de concentração de poluentes.

4.2 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO (PTS)

4.2.1 Valores históricos de médias mensais de PTS

A revisão bibliográfica permitiu o levantamento da concentração média mensal de PTS no ar atmosférico de Uberlândia-MG entre março de 2003 e janeiro de 2018. Nesse intervalo, as informações dos seguintes meses estavam indisponíveis (provavelmente por ausência de medição devido a problemas técnicos ou por falta de mão de obra para operar os equipamentos): fevereiro e abril/2006; setembro e outubro/2008; de janeiro/2009 a junho/2012; outubro/2012; e janeiro e fevereiro/2016. Esses dados são apresentados na Figura 44.

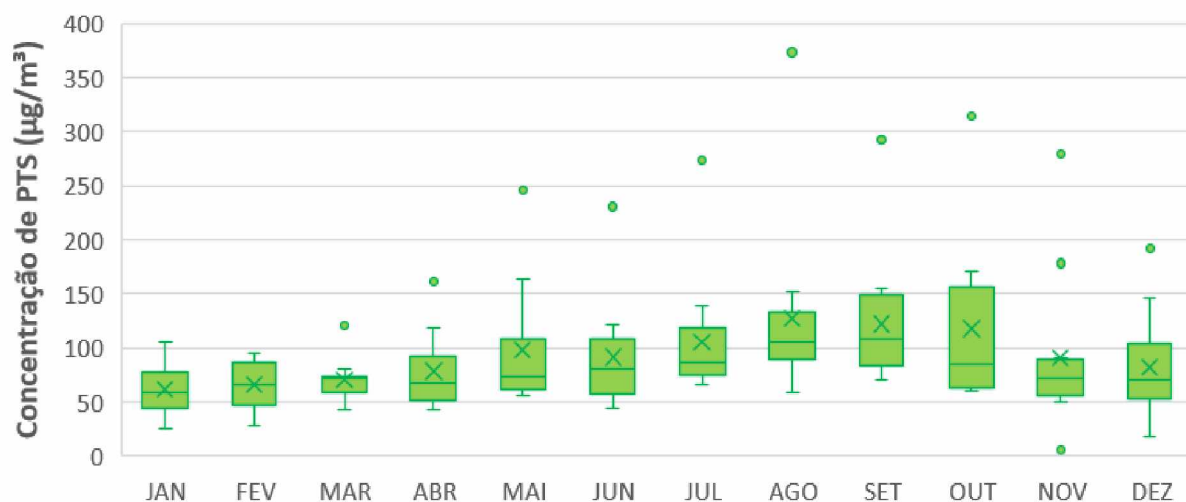
Figura 44 - Médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018.



Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013) e Silva (2018).

Pela análise gráfica da Figura 44, é possível suspeitar da presença de *outliers* entre os dados históricos disponíveis, sobretudo nas médias mensais de 2014. Dessa forma, esses dados foram organizados por mês e foi desenvolvido um gráfico do tipo *box plot* (Figura 45) para análise comparativa de cada mês dos anos disponíveis. Esse gráfico permitiu confirmar a presença de *outliers* em quase todos os meses do ano, exceto janeiro e fevereiro.

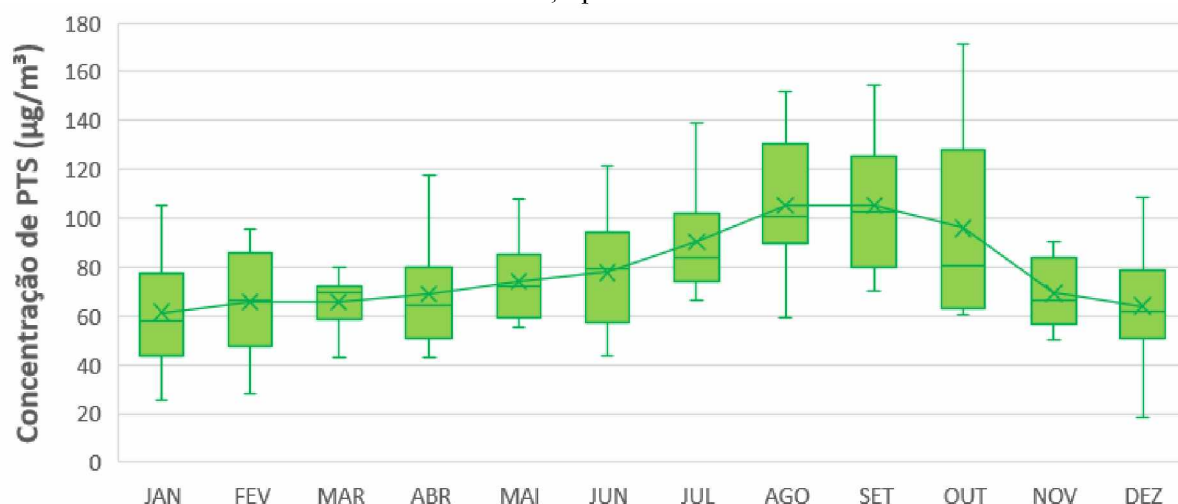
Figura 45 - Gráfico *box plot* das médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018.



Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013) e Silva (2018).

O passo seguinte foi eliminar os *outliers*, por estes não representarem dados estatisticamente confiáveis. Dessa forma, os dados relativos aos seguintes meses foram excluídos: novembro/2004; maio/2006; novembro/2007; dezembro/2008; e março a dezembro/2014. A Figura 46 traz o gráfico *box plot* das médias mensais de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018 após a exclusão dos *outliers*.

Figura 46 - Gráfico *box plot* das médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2018, após a exclusão dos *outliers*.



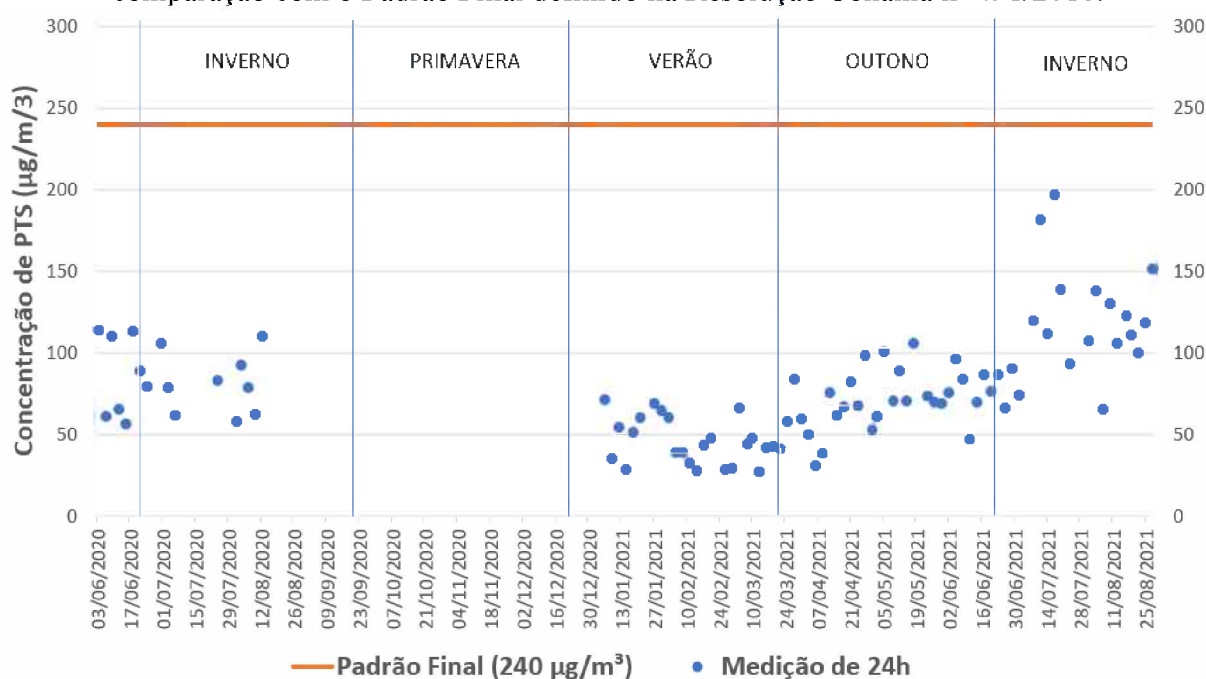
Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013) e Silva (2018).

4.2.2 Medições realizadas de PTS

No presente trabalho, foram realizadas 90 medições válidas de concentração de partículas totais em suspensão, entre 3/6/2020 e 28/8/2021. Devido a problemas mecânicos no motoaspirador, não foi possível operar o equipamento entre 15/8/2020 e 3/1/2021, razão pela qual nesse período as medições não aconteceram.

A Figura 47 apresenta os resultados encontrados de concentração de PTS média de 24 horas no ar atmosférico. Eles foram comparados com os limites estipulados na Resolução Conama n° 491/2018 (vide Tabela 2). Essa norma estabelece como padrão final o limite de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentração de PTS, o qual não pode ser ultrapassado em um intervalo de 24 horas³. Observa-se que, no período analisado, esse padrão não foi ultrapassado, nem mesmo na estação de inverno (quando concentrações mais elevadas são esperadas).

Figura 47 - Concentração média diária de PTS em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021, em comparação com o Padrão Final definido na Resolução Conama n° 491/2018.

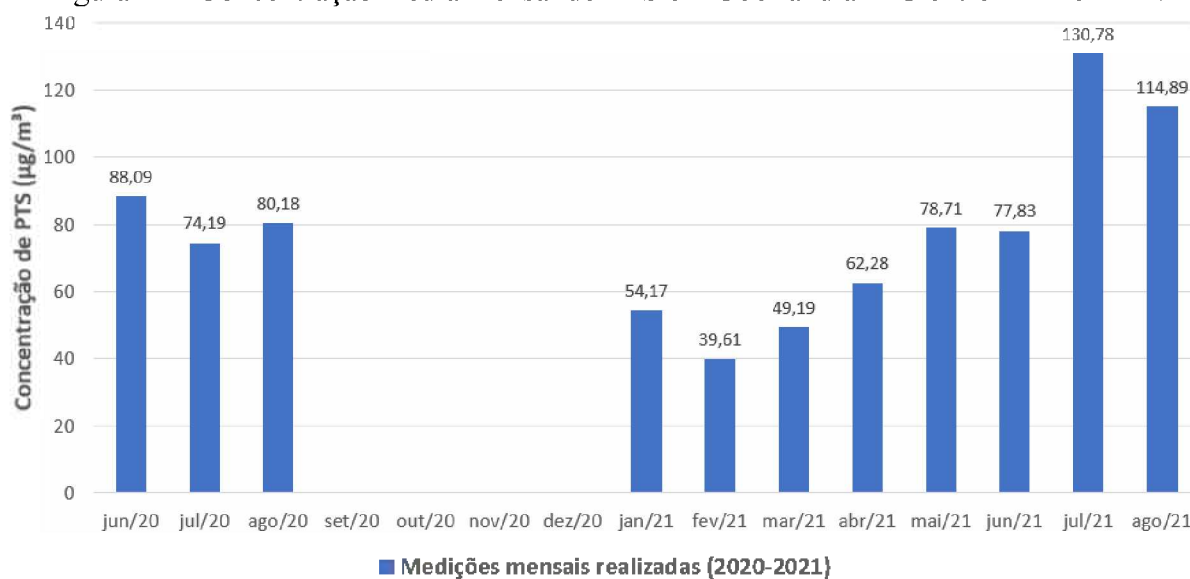


Fonte: autor (2021).

A Figura 48 mostra a concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG, calculada durante o período analisado.

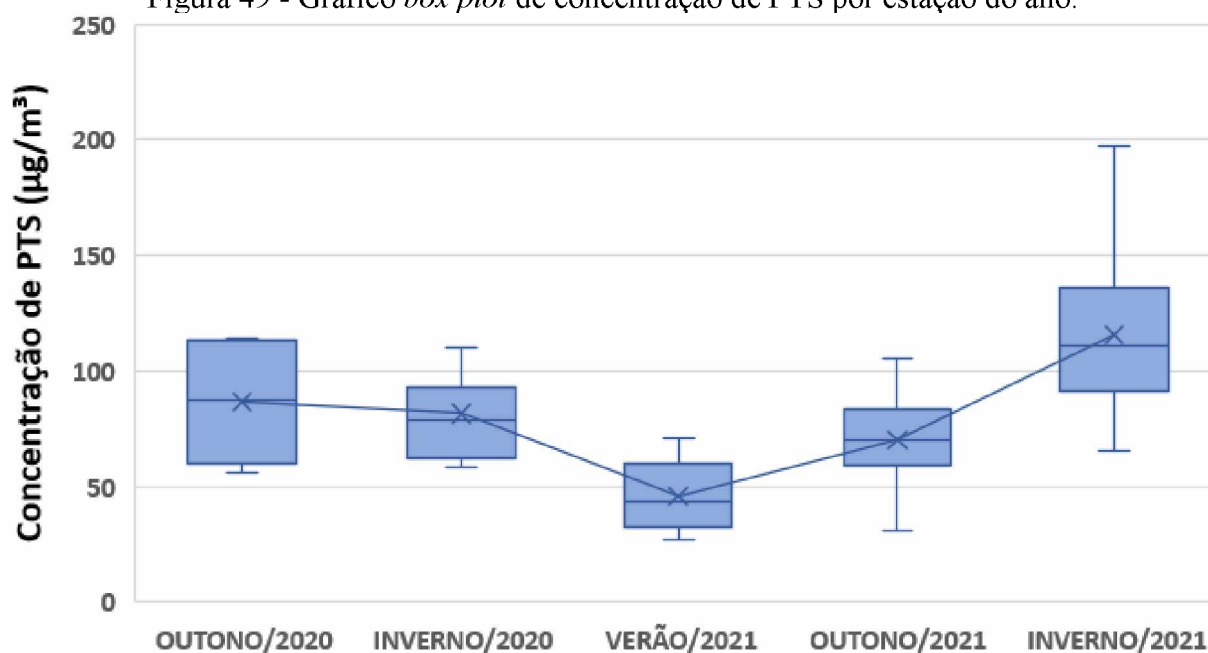
3 Mesmo limite que estava anteriormente definido na Resolução Conama n° 3/1990 (revogada) como padrão primário de qualidade do ar para a concentração de PTS na média de 24 horas.

Figura 48 - Concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021.



Fonte: autor (2021).

A Figura 49 traz uma análise por gráfico *box plot* das concentrações reunidas por estação do ano. De forma condizente com a literatura, as menores concentrações foram observadas na estação do verão de 2021 (média de 45,59 µg/m³) e as maiores, no inverno do mesmo ano (115,38 µg/m³). Observa-se que, no inverno de 2020 (período de fortes restrições devido à pandemia), as concentrações de PTS (média de 81,54 µg/m³) ficaram em patamares bem inferiores às do inverno de 2021 (após o relaxamento das restrições).

Figura 49 - Gráfico *box plot* de concentração de PTS por estação do ano.

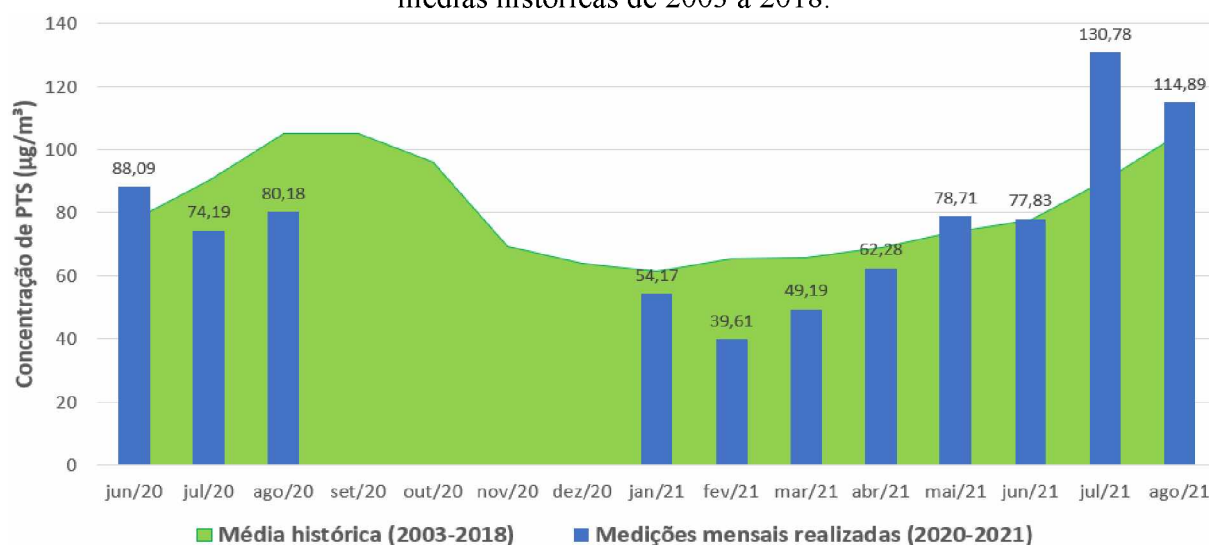
Fonte: autor (2021).

4.2.3 Comparação das médias mensais de PTS com o registro histórico

Essa etapa do trabalho teve o intuito de comparar a concentração média mensal de PTS no período de estudo (de junho/2020 a agosto/2021) com as médias mensais históricas dos anos anteriores (2003 a 2018).

Para isso, foram utilizadas as informações constantes na Figura 46, referentes às concentrações médias de cada mês, entre 2003 e 2018. Esses dados foram reunidos com as médias dos meses de junho/2020 a agosto/2021, constantes na Figura 48, e expostos no gráfico apresentado na Figura 50.

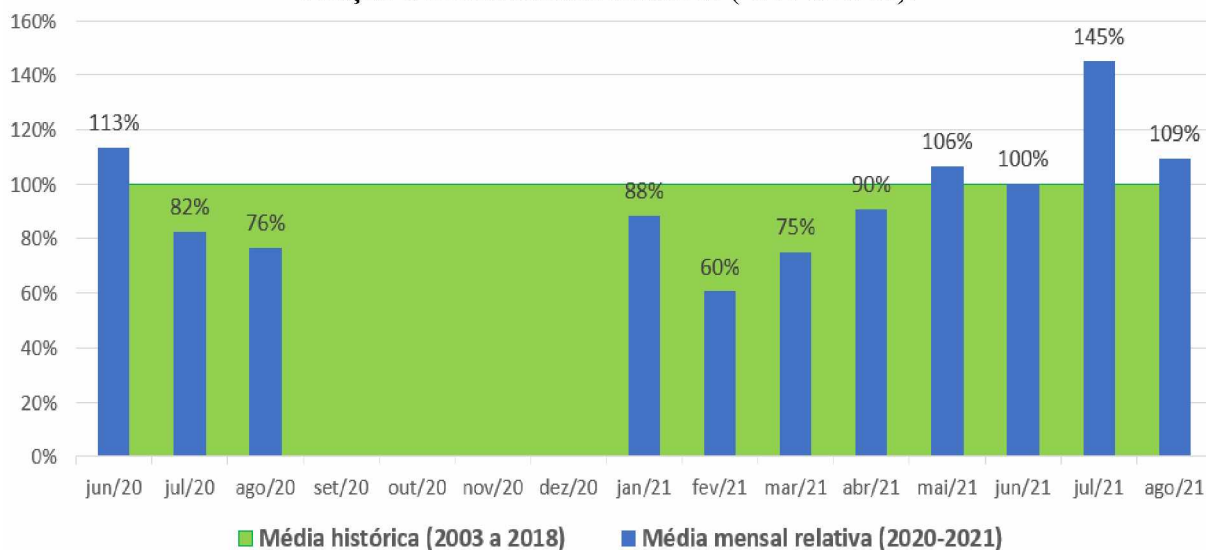
Figura 50 - Comparação das concentrações médias de PTS medidas em 2020 e 2021 com as médias históricas de 2003 a 2018.



Fonte: autor (2021).

Complementarmente, foi também realizada uma análise da concentração relativa de PTS. A média histórica (área verde do gráfico da Figura 50) varia a cada mês do ano. No intuito de padronizar a média histórica, considerou-se que o valor absoluto da concentração em cada mês equivalesse a 100%. Dessa forma, a área verde do gráfico (Figura 51) passou a apresentar o topo linearizado, enquanto as barras azuis indicam o valor percentual da concentração média mensal de PTS com relação à média histórica. Para exemplificar, em junho de 2020, a concentração média mensal de PTS medida (88,09 µg/m³) representou 113% da média histórica. Em julho, a concentração de 74,19 µg/m³ representou 82% da concentração média histórica do poluente.

Figura 51 - Concentração média mensal de PTS do período analisado (2020 e 2021) em relação à média mensal histórica (2003 a 2018).



Fonte: autor (2021).

A análise da Figura 51 indica que a concentração de PTS entre julho/2020 e abril/2021 (nos meses em que essa informação pôde ser levantada) esteve abaixo dos valores médios históricos. Esse intervalo corresponde a um período de grandes restrições de atividades comerciais, econômicas, sociais e escolares em decorrência da pandemia provocada pela Covid-19. Nesse período, a redução de concentração de PTS com relação ao histórico de 2003 a 2018 foi, em média, de 21,2%.

De maio/2021 em diante, a concentração medida de PTS ultrapassou os valores histórico em todos os meses analisados. O maior valor relativo registrado foi em julho/2021, imediatamente após a Prefeitura de Uberlândia-MG voltar a autorizar o funcionamento dos estabelecimentos de ensino curricular. Nesse mês foi registrada uma concentração de PTS 45% superior à média histórica.

A título de registro para trabalhos futuros, a Tabela 3 reúne os dados históricos (de 2003 a 2018) com os dados coletados neste trabalho (de 2020 a 2021), apresentando as médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG em todo esse período.

Tabela 3 - Médias mensais de concentração de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

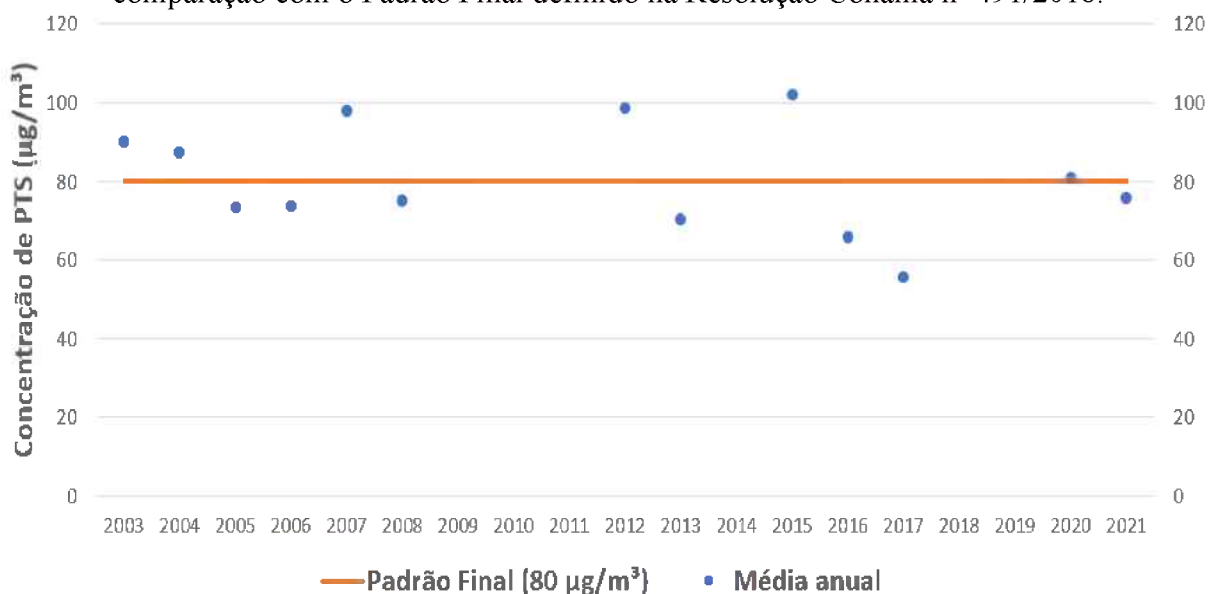
Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média anual
2003	-	-	68,76	83,63	84,33	121,72	74,98	133,93	115,99	80,16	84,37	52,85	90,07
2004	63,23	95,27	71,38	117,67	55,08	81,39	67,07	90,61	107,59	104,57	-	108,68	87,51
2005	74,01	63,55	43,00	42,80	57,00	61,13	123,09	110,09	69,99	89,34	57,59	87,80	73,28
2006	68,86	-	73,15	-	-	78,49	92,28	89,50	84,23	62,05	58,77	56,17	73,72
2007	52,86	55,62	59,52	63,82	73,55	108,15	139,25	151,69	154,64	150,92	-	67,31	97,94
2008	50,27	68,56	58,85	64,65	85,40	79,76	89,63	100,84	-	-	77,78	-	75,08
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-	-	101,91	111,25	117,47	-	90,21	72,95	98,76
2013	42,32	87,72	71,06	69,32	70,10	56,22	80,45	98,27	82,98	63,86	66,06	55,04	70,28
2014	87,95	28,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	105,26	80,52	72,04	76,12	107,73	89,88	83,57	130,79	149,21	171,30	83,38	75,62	102,12
2016	-	-	80,02	51,40	61,00	57,36	73,95	79,55	97,57	60,77	50,21	45,76	65,76
2017	44,39	44,81	58,89	50,03	72,35	43,80	66,10	59,34	71,71	80,65	55,71	18,37	55,51
2018	25,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	88,09	74,19	80,18	-	-	-	-	80,82
2021	54,17	39,61	49,19	62,28	78,71	77,83	130,78	114,89	-	-	-	-	75,93

Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013), Silva (2018) e autor (2021).

4.2.4 Comparação das médias anuais de PTS com o registro histórico

Calculou-se, também, a média anual de 2003 a 2021 (coluna da extrema direita da Tabela 3). Porém, ressalta-se que a média anual pode não ser representativa nos anos em que há ausência de dados mensais. Dessa forma, optou-se por excluir da análise as médias anuais de 2014 e 2018. Já a média anual de 2020 foi mantida por integrar o presente trabalho (mesmo sabendo-se que ela inclui apenas três meses do período de inverno). Os valores das médias anuais da concentração de PTS foram plotados no gráfico apresentado na Figura 52.

Figura 52 - Concentração média anual de PTS em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021, em comparação com o Padrão Final definido na Resolução Conama nº 491/2018.



Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013), Silva (2018) e autor (2021).

A Resolução Conama nº 491/2018 determina o limite de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentração de PTS como média anual (vide Tabela 2), valor que não pode ser ultrapassado⁴. Observa-se que esse limite foi ultrapassado em 2003, 2004, 2007, 2012, 2015 e 2020. Porém, não se pode afirmar categoricamente que houve violação do limite legal, uma vez que em todos esses anos (à exceção de 2015) as medições estiveram incompletas.

Da mesma forma, em decorrência dessa ausência de dados, não é possível determinar se há uma tendência de alta ou de baixa na concentração média anual de PTS em Uberlândia-MG.

4.2.5 Correlação das médias mensais de PTS com variáveis atmosféricas

Os valores históricos médios mensais de concentração de PTS (Figura 46) foram comparados com as médias históricas das variáveis independentes atmosféricas (Figuras 38 a 42)⁵. A Tabela 4 apresenta a correlação calculada entre essas variáveis.

4 Mesmo limite que estava anteriormente definido na Resolução Conama nº 3/1990 (revogada) como padrão primário de qualidade do ar para a concentração de PTS na média anual.

5 Conforme esclarecido no item 4.1.7, o parâmetro radiação solar foi excluído por ter apresentado perfil mensal indefinido e estatisticamente não confiável.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação entre a concentração de PTS e variáveis atmosféricas.

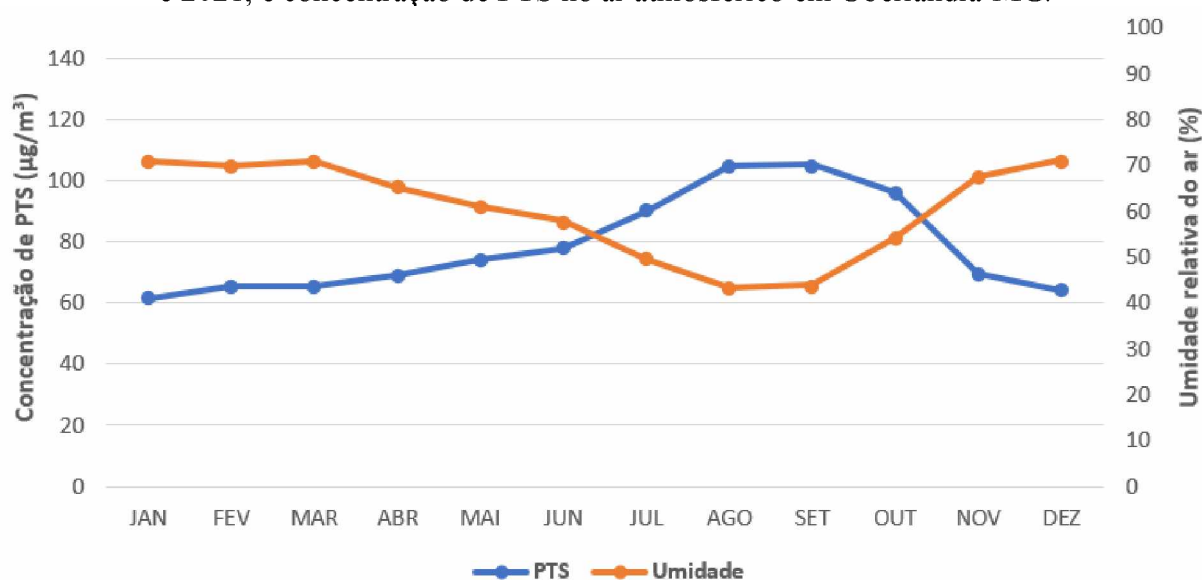
	PTS	Precipitação	Umidade	Temperatura	Pressão	Vento
PTS	1,0000	-0,7037	-0,9754	-0,0644	0,5625	0,8842
Precipitação	-0,7037	1,0000	0,8062	0,6065	-0,9116	-0,3492
Umidade	-0,9754	0,8062	1,0000	0,2559	-0,7129	-0,8125
Temperatura	-0,0644	0,6065	0,2559	1,0000	-0,8221	0,2023
Pressão	0,5625	-0,9116	-0,7129	-0,8221	1,0000	0,2173
Vento	0,8842	-0,3492	-0,8125	0,2023	0,2173	1,0000

Fonte: autor (2021).

A variável independente atmosférica que demonstrou maior correlação (em módulo) com a concentração de PTS foi a umidade relativa do ar atmosférico, com um índice de -0,9754 (correlação muito forte). Outros parâmetros que demonstraram forte correlação foram a velocidade do vento (0,8842), e a precipitação de chuvas (-0,7037).

A Figura 53 mostra graficamente a influência inversa que a umidade apresenta ter na poluição do ar. Observa-se que nos meses em que umidade é mais alta, a concentração de PTS é mais baixa e vice-versa.

Figura 53 - Gráfico comparativo entre valores históricos de umidade relativa do ar, entre 2003 e 2021, e concentração de PTS no ar atmosférico em Uberlândia-MG.



Fonte: Inmet (2021) e autor (2021).

Devido à característica higroscópica do material particulado, em altas umidades do ar atmosférico, as partículas em suspensão se tornam mais pesadas e se decantam mais

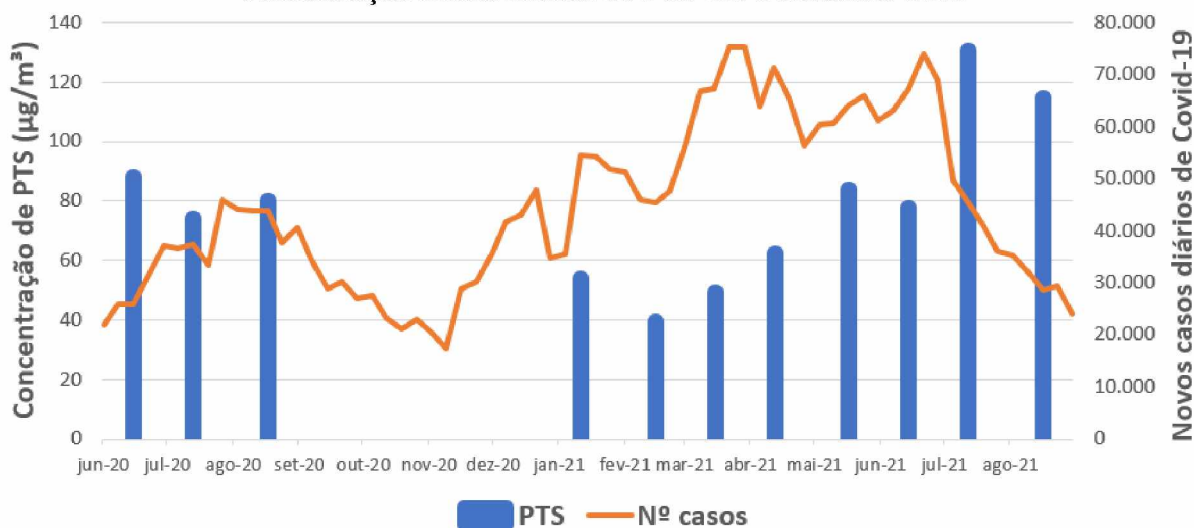
facilmente, tornando o ar mais puro. Já as chuvas, apesar de “lavarem” com eficiência o ar atmosférico, promovem esse efeito apenas de forma temporária, durante a precipitação. Como a presença da umidade no ar é um efeito mais duradouro que a precipitação de chuvas, aquela é a variável que apresenta a maior influência na concentração de PTS no ar atmosférico.

Já a correlação direta entre a velocidade do vento e a concentração do PTS pode ser explicada pelo vento predominante em Uberlândia-MG, vindo de nordeste (Figura 8), o qual favorece o transporte de poluentes do Distrito Industrial para o centro da cidade (LIMA, 2007).

4.2.6 Comparação das médias mensais de PTS com períodos da pandemia de Covid-19

A Figura 54 mostra uma comparação entre o número de novos casos de Covid-19 registrados diariamente no Brasil (média móvel de sete dias) com a concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG. A análise gráfica sugere que o aumento no número de novos casos diários contribuiu para a redução da circulação de veículos – seja pela aplicação de normas mais rigorosas ou pela conscientização das pessoas – e, conseqüentemente, da concentração de PTS no ar atmosférico.

Figura 54 - Comparação entre o número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil com a concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG.



Fonte: Worldometer (2021).

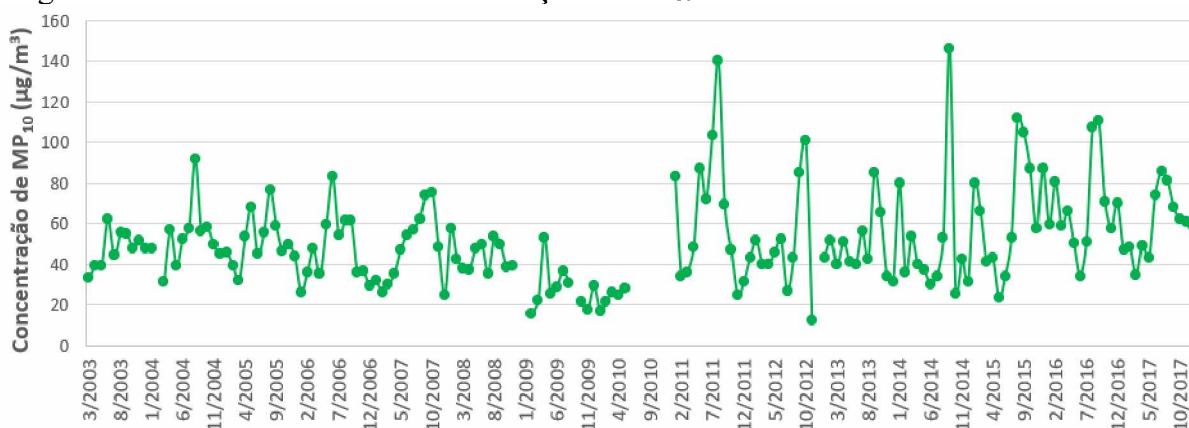
A tendência inversa também pôde ser observada. Com a redução acentuada do número de casos em julho e agosto/2021, a concentração de PTS voltou a subir a níveis não antes registrados desde o início da pandemia.

A correlação calculada entre o total mensal de novos casos de Covid-19 no Brasil e a concentração média mensal de PTS em Uberlândia-MG foi de $-0,5139$, indicando a relação inversa entre eles, porém de moderada intensidade. Ainda assim, essa correlação moderada deve ser interpretada com cautela, uma vez que existe a possibilidade de subnotificação do número de casos. Por exemplo, durante o período crescente da segunda onda (novembro/2020 a abril/2021), a curva apresentou oscilações para baixo não características de curvas de crescimento. E o registro incoerente do número de casos pode afetar diretamente o cálculo de correlação entre duas variáveis.

4.3 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS INALÁVEIS (MP₁₀)

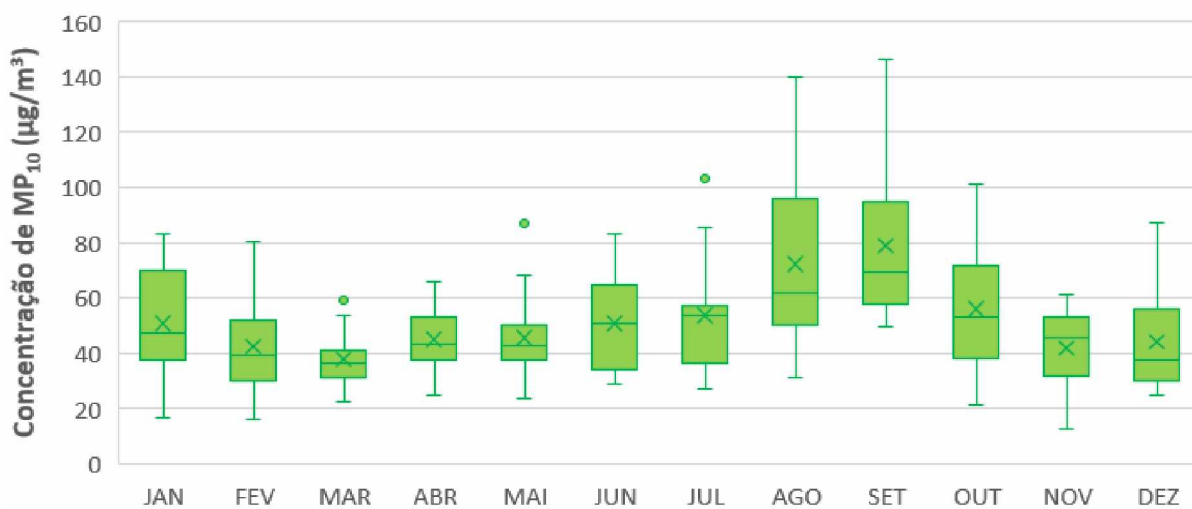
4.3.1 Valores históricos de médias mensais de MP₁₀

A revisão bibliográfica permitiu o levantamento da concentração média mensal de MP₁₀ no ar atmosférico de Uberlândia-MG entre março de 2003 e dezembro de 2017. Nesse intervalo, as informações dos seguintes meses estavam indisponíveis (provavelmente por ausência de medição devido a problemas técnicos ou por falta de mão de obra para operar os equipamentos): fevereiro/2004; dezembro/2008; janeiro e setembro/2009; de junho a dezembro/2010 e dezembro/2012. As médias mensais desse período são apresentadas na Figura 55.

Figura 55 - Médias mensais de concentração de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017.

Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013) e Silva (2018).

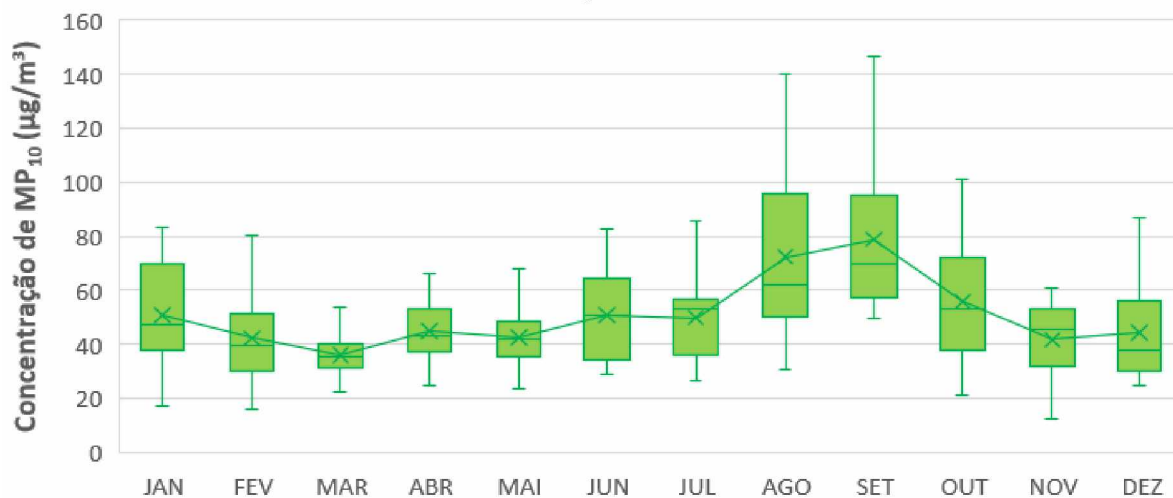
Similarmente ao trabalho estatístico realizado no caso do PTS, também foi desenvolvido um gráfico do tipo *box plot* para identificar a possível presença de *outliers* entre os dados históricos de MP_{10} disponíveis (Figura 56). Na análise comparativa de cada mês dos anos disponíveis, foi possível identificar a presença de apenas três *outliers*, nos meses de março, maio e julho.

Figura 56 - Gráfico *box plot* das médias mensais de concentração de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017.

Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013) e Silva (2018).

Após a exclusão dos *outliers* (relativos aos meses de maio e julho/2011 e março/2016), um novo gráfico *box plot* foi plotado (Figura 57), com as médias mensais de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017, trazendo apenas dados estatisticamente confiáveis, ou seja, sem *outliers*.

Figura 57 - Gráfico *box plot* das médias mensais de concentração de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2003 e 2017, após a exclusão dos *outliers*.



Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013) e Silva (2018).

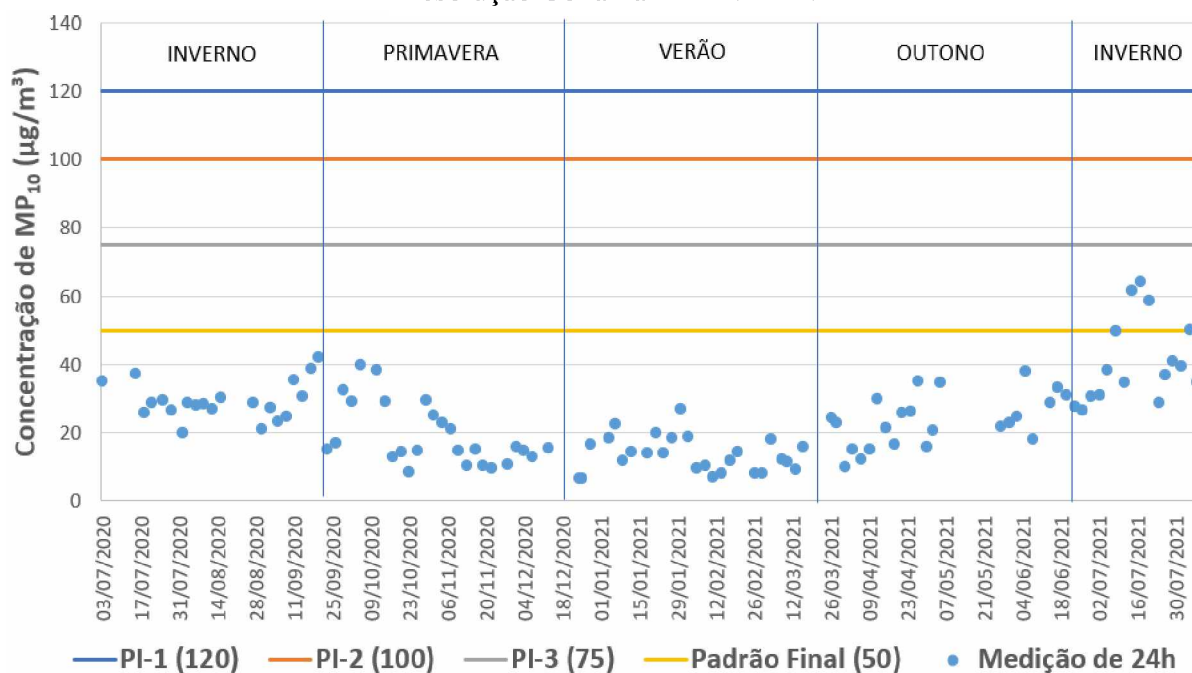
4.3.2 Medições realizadas de MP_{10}

No presente trabalho, foram realizadas 111 medições válidas de concentração de MP_{10} , entre 3/7/2020 e 7/8/2021.

A Figura 58 apresenta os resultados encontrados de concentração de MP_{10} média de 24 horas no ar atmosférico. Os dados experimentais foram comparados com os limites estipulados na Resolução Conama nº 491/2018 (vide Tabela 2). Essa norma estabelece como padrões intermediários as concentrações médias diárias de MP_{10} de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-1), 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-2) e 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-3), além do padrão final de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁶. Observa-se que, no período analisado, os padrões intermediários 1 e 2 não foram ultrapassados. O padrão final foi ultrapassado em quatro ocasiões (nas medições realizadas em 14, 17 e 20/7, além de 4/8/2021, coincidentes com o pico do inverno de 2021).

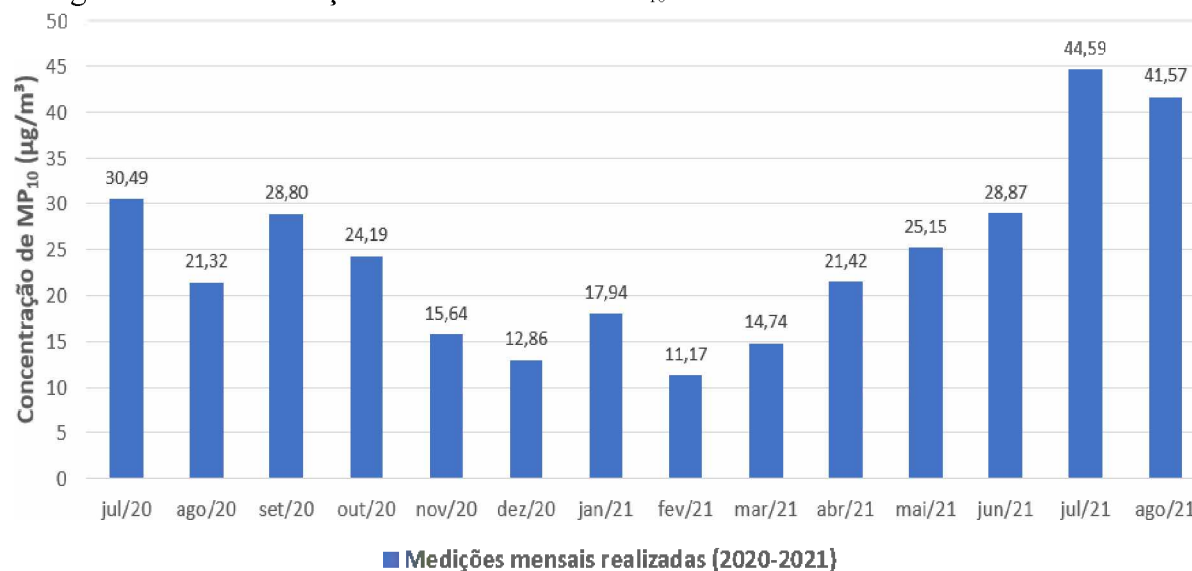
⁶ A Resolução Conama nº 3/1990 (revogada) estabelecia como padrão secundário e primário de qualidade do ar o limite de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a concentração de MP_{10} na média de 24 horas.

Figura 58 - Concentração média diária de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021, em comparação com os Padrões Intermediários 1, 2 e 3 e com o Padrão Final definidos na Resolução Conama nº 491/2018.



A Figura 59 mostra a concentração média mensal de MP_{10} em Uberlândia-MG, calculada durante o período analisado.

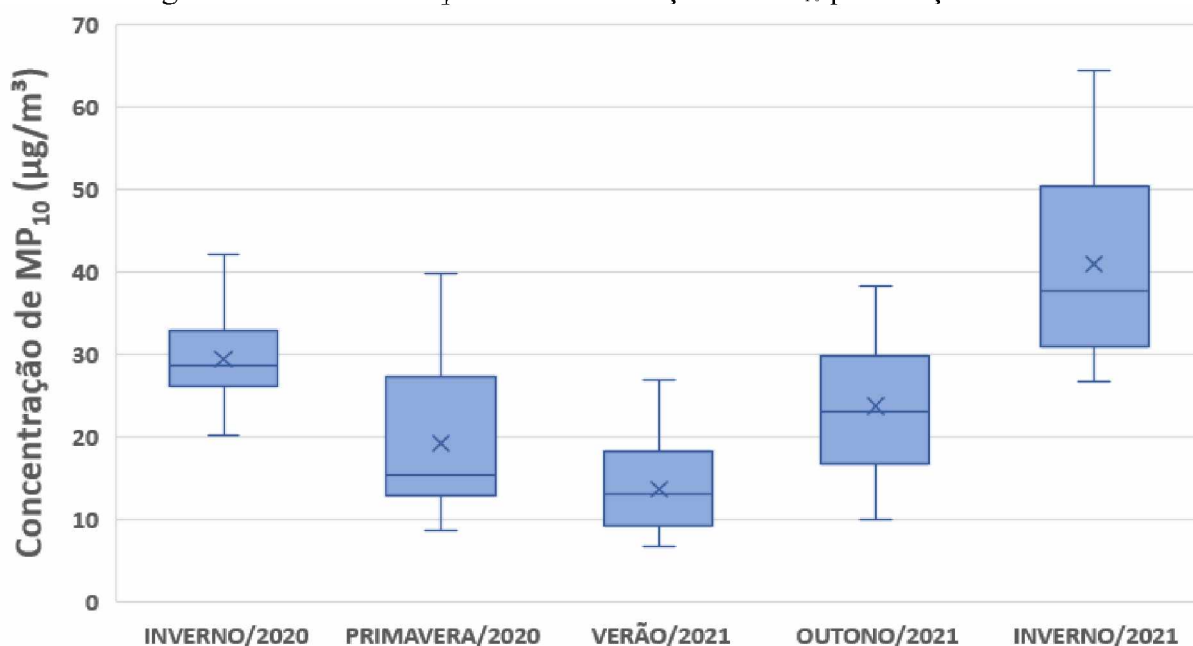
Figura 59 - Concentração média mensal de MP_{10} em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021.



A Figura 60 traz uma análise por gráfico *box plot* das concentrações reunidas por estação do ano. Observa-se que, no inverno de 2021 (após o relaxamento das restrições devido à pandemia), a concentração de MP_{10} média da estação ($41,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi 39,1% superior à média do inverno de 2020 ($29,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$), período de fortes restrições. O verão de

2021 foi a estação em que se registrou a menor concentração média do poluente ($13,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 60 - Gráfico *box plot* de concentração de MP_{10} por estação do ano.



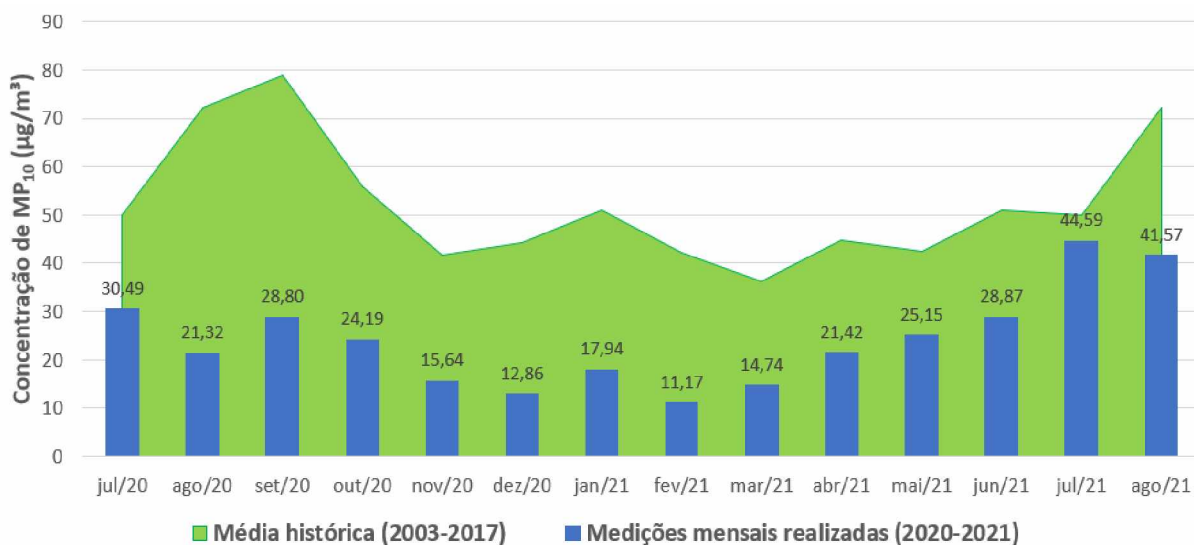
Fonte: autor (2021).

4.3.3 Comparação das médias mensais de MP_{10} com o registro histórico

Essa etapa do trabalho teve o intuito de comparar a concentração média mensal de MP_{10} no período de estudo (de julho/2020 a agosto/2021) com as médias mensais históricas dos anos anteriores (2003 a 2017).

Para isso, foram utilizadas as informações constantes na Figura 57, referentes às concentrações médias de cada mês, entre 2003 e 2017. Esses dados foram reunidos com as médias dos meses de julho/2020 a agosto/2021, constantes na Figura 59, e expostos no gráfico apresentado na Figura 61.

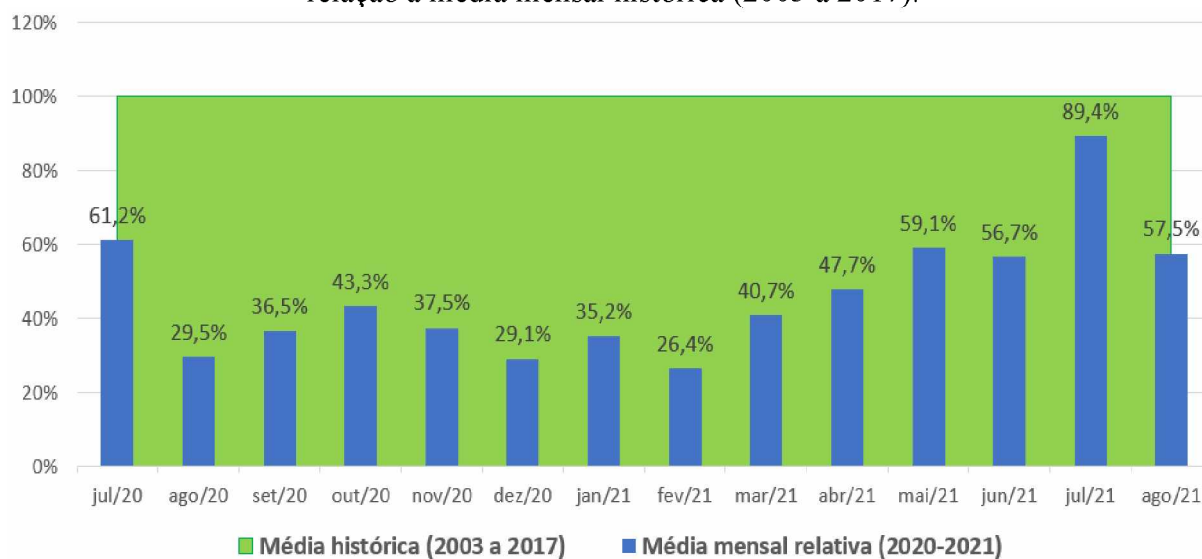
Figura 61 - Comparação das concentrações médias de MP_{10} medidas em 2020 e 2021 com as médias históricas de 2003 a 2017.



Fonte: autor (2021).

Complementarmente, foi também realizada uma análise da concentração relativa de MP_{10} . A média histórica (área verde do gráfico da Figura 61), que varia a cada mês do ano, foi padronizada em 100% no gráfico da Figura 62. Dessa forma, a área verde desse gráfico passou a apresentar o topo linearizado, enquanto as barras azuis indicam o valor percentual da concentração média mensal de MP_{10} com relação à média histórica. Para exemplificar, em julho de 2020, a concentração média mensal de MP_{10} medida (30,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) representou 61,2% da média histórica. Em agosto, a concentração de 21,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representou 29,5% da concentração média histórica do poluente.

Figura 62 - Concentração média mensal de MP_{10} do período analisado (2020 e 2021) em relação à média mensal histórica (2003 a 2017).



Fonte: autor (2021).

A análise da Figura 62 indica que a concentração de MP₁₀ em todo o período analisado (entre julho/2020 e agosto/2021) esteve abaixo dos valores médios históricos. No período de maior restrição de atividades comerciais, econômicas, sociais e escolares em decorrência da pandemia provocada pela Covid-19, a média da concentração relativa mensal foi de 41,9%. Concluiu-se, portanto, que a melhora na qualidade do ar atmosférico referente ao poluente MP₁₀ entre julho/2020 e junho/2021 foi de 58,1% com relação à média histórica de cada mês entre 2003 e 2017.

Em julho/2021, seguinte ao mês em que a Prefeitura de Uberlândia-MG voltou a autorizar o funcionamento dos estabelecimentos de ensino curricular, observou-se que a concentração relativa média voltou a subir, alcançando 89,4% da média histórica.

A título de registro para trabalhos futuros, a Tabela 5 reúne os dados históricos (de 2003 a 2017) com os dados coletados neste trabalho (de 2020 a 2021), apresentando as médias mensais de concentração de MP₁₀ em Uberlândia-MG em todo esse período.

Tabela 5 - Médias mensais de concentração de MP₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

DATA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média anual
2003	-	-	33,26	39,19	39,40	62,15	44,80	55,69	54,93	47,75	51,70	48,10	47,70
2004	47,77	-	31,37	56,89	39,00	52,44	57,30	91,97	56,00	58,36	49,48	45,38	53,27
2005	45,71	39,43	32,19	53,71	68,24	44,89	55,51	76,61	59,03	46,62	49,79	43,79	51,29
2006	26,24	35,69	47,53	35,16	59,81	83,00	54,37	61,54	61,44	35,79	36,34	29,40	47,19
2007	32,22	25,89	30,02	35,48	47,28	54,55	57,25	62,33	74,09	75,52	48,67	24,68	47,33
2008	57,36	42,73	38,22	37,48	47,84	49,86	35,65	53,65	49,75	38,55	39,46	-	44,60
2009	-	15,91	22,21	52,99	25,33	29,03	36,38	30,95	-	21,34	17,58	29,19	28,09
2010	16,86	21,57	26,20	24,91	28,11	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	83,30	34,16	36,08	48,49	-	72,36	-	139,97	69,54	47,02	24,97	31,45	58,73
2012	43,27	51,71	39,93	39,93	46,00	52,07	26,79	42,88	85,33	101,09	12,67	-	49,24
2013	43,27	51,71	39,93	51,21	40,92	39,96	56,43	42,83	85,33	65,20	33,88	31,45	48,51
2014	79,76	35,99	53,62	39,62	37,54	30,06	34,28	53,00	146,42	25,56	42,75	31,45	50,84
2015	79,76	66,22	41,25	43,17	23,46	34,28	53,00	112,30	104,75	87,34	57,85	87,05	65,87
2016	59,76	80,36		66,07	50,21	34,28	50,89	107,18	110,52	70,68	57,85	70,24	68,91
2017	47,06	48,59	34,88	49,22	42,93	74,17	85,56	81,45	68,10	61,94	61,11	58,91	59,49
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	30,49	21,32	28,80	24,19	15,64	12,86	22,22
2021	17,94	11,17	14,74	21,42	25,15	28,87	44,59	41,57	-	-	-	-	25,68

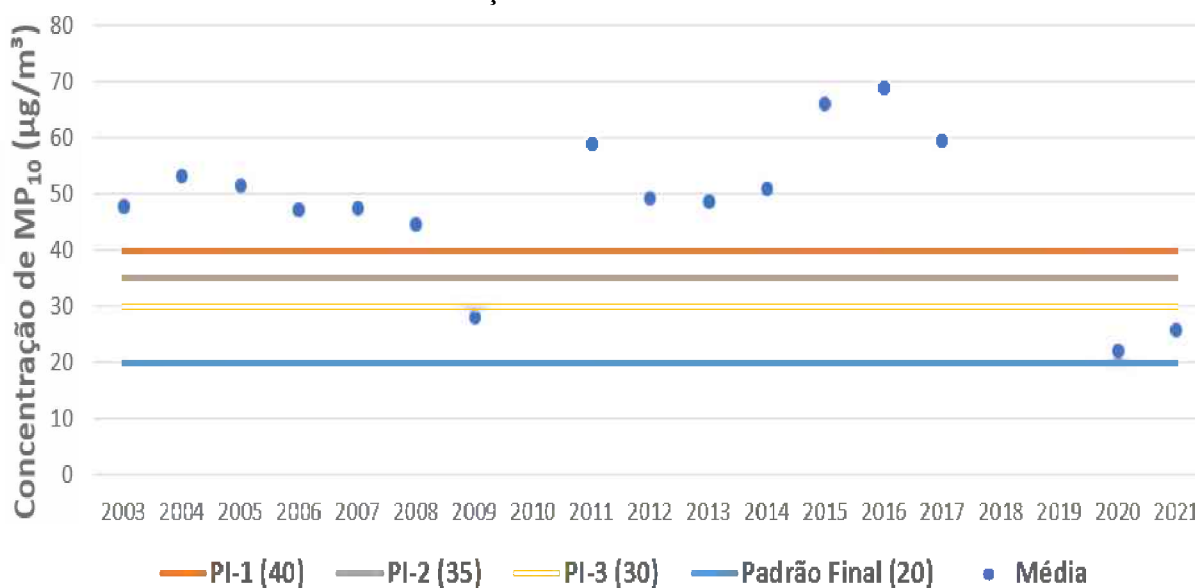
Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013), Silva (2018) e autor (2021).

4.3.4 Comparação das médias anuais de MP₁₀ com o registro histórico

Calculou-se, também, a média anual de 2003 a 2021 (coluna da extrema direita da tabela). Optou-se por excluir da tabela o valor da média anual do ano de 2010, uma vez que para esse ano havia apenas a medição de cinco meses (janeiro a maio, a maioria deles chuvosos), fazendo com que a média desse período não representasse bem o ano completo.

Porém, assim como destacado na análise do PTS, alerta-se que a média anual pode não representar bem determinado período, sobretudo nos anos em que há ausência de dados mensais. Apesar dessa ressalva, a título de informação, os valores das médias anuais da concentração de MP₁₀ foram plotados no gráfico apresentado na Figura 63.

Figura 63 - Concentração média anual de MP₁₀ em Uberlândia-MG entre 2003 e 2021, em comparação com os Padrões Intermediários 1, 2 e 3 e com o Padrão Final definidos na Resolução Conama nº 491/2018.



Fonte: Lima (2007), Lira (2009), Fernandes (2013), Silva (2018) e autor (2021).

A Resolução Conama nº 491/2018 estabelece como padrões intermediários as concentrações médias anuais de MP₁₀ de 40 µg/m³ (PI-1), 35 µg/m³ (PI-2) e 30 µg/m³ (PI-3), além do padrão final de 20 µg/m³, valor que não pode ser ultrapassado.

Observa-se que o limite do Padrão Intermediário 1 foi ultrapassado na maioria da série histórica (apesar de que o limite definido na legislação que esteve em vigor até 2018 era de

50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁷. Apenas nos anos de 2009, 2020 e 2021 a concentração média anual se situou abaixo do Padrão Intermediário 3, porém acima do Padrão Final. Segundo Fernandes (2013), em 2009, ocorreram interrupções nas amostragens devido a problemas de funcionamento do amostrador, o que pode explicar o resultado destoante. Já em 2020 e 2021, supõe-se que a melhora na qualidade do ar tenha sido em função da redução da circulação de veículos, devido à pandemia de Covid-19.

Apesar da ausência de algumas medições mensais, o que inviabiliza o cálculo preciso da média anual em determinados anos, o gráfico apresentado na Figura 63 sugere uma redução real da concentração de MP_{10} (durante o período da pandemia de Covid-19) com relação aos anos anteriores. Isso porque as medições realizadas entre julho/2020 e agosto/2021 englobaram um ano completo e apresentaram as menores médias anuais de todo o período histórico analisado.

4.3.5 Correlação das médias mensais de MP_{10} com variáveis atmosféricas

Os valores históricos médios mensais de concentração de MP_{10} (Figura 57) foram comparados com as médias históricas das variáveis independentes atmosféricas (Figuras 38 a 42)⁸. A Tabela 6 apresenta a correlação calculada entre essas variáveis.

Tabela 6 - Coeficientes de correlação entre a concentração de MP_{10} e variáveis atmosféricas.

	MP_{10}	Precipitação	Umidade	Temperatura	Pressão	Vento
MP_{10}	1,0000	-0,4904	-0,8467	0,1074	0,3962	0,8287
Precipitação	-0,4904	1,0000	0,8062	0,6065	-0,9116	-0,3492
Umidade	-0,8467	0,8062	1,0000	0,2559	-0,7129	-0,8125
Temperatura	0,1074	0,6065	0,2559	1,0000	-0,8221	0,2023
Pressão	0,3962	-0,9116	-0,7129	-0,8221	1,0000	0,2173
Vento	0,8287	-0,3492	-0,8125	0,2023	0,2173	1,0000

Fonte: autor (2021).

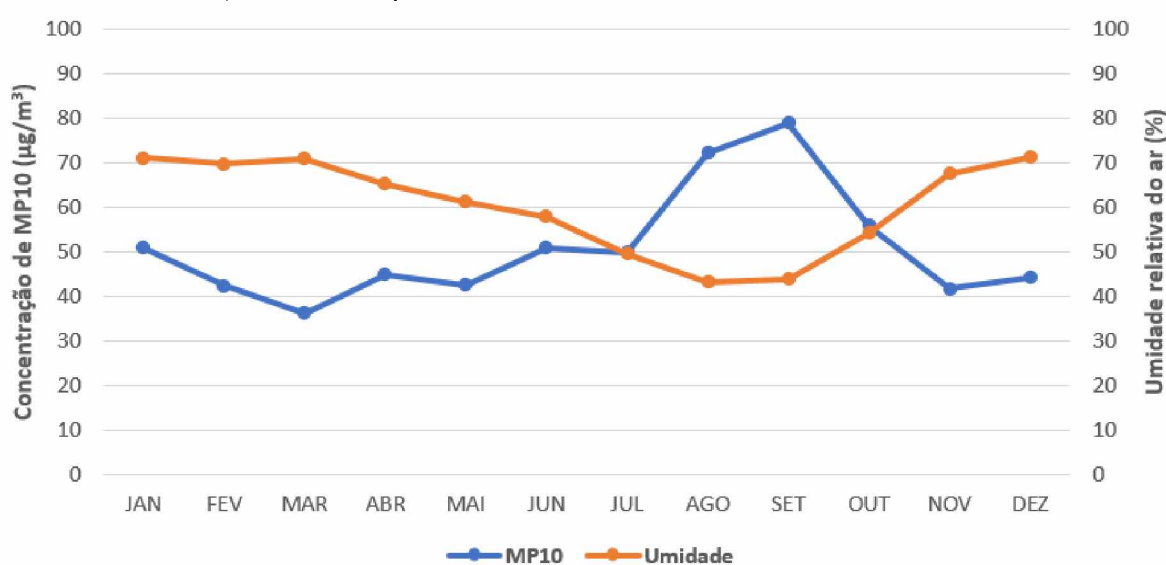
7 A Resolução Conama nº 3/1990 (revogada) estabelecia como padrão secundário e primário de qualidade do ar o limite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a concentração de MP_{10} na média anual.

8 Conforme esclarecido no item 4.1.7, o parâmetro radiação solar foi excluído por ter apresentado perfil mensal indefinido e estatisticamente não confiável.

A variável independente atmosférica que demonstrou maior correlação (em módulo) com a concentração de MP_{10} foi a umidade relativa do ar atmosférico, com um índice de -0,8467 (correlação forte). Outro parâmetro que demonstrou forte correlação foi a velocidade do vento (0,8287).

A Figura 64 mostra graficamente a influência inversa que a umidade apresenta ter na poluição do ar. Observa-se que nos meses em que umidade é mais alta, a concentração de MP_{10} é mais baixa e vice-versa.

Figura 64 - Gráfico comparativo entre valores históricos de umidade relativa do ar, entre 2003 e 2021, e concentração de MP_{10} no ar atmosférico em Uberlândia-MG.



Fonte: Inmet (2021) e autor (2021).

Similarmente ao que ocorre com o PTS, a alta umidade do ar atmosférico faz com que as partículas inaláveis (MP_{10}) fiquem mais pesadas por serem higroscópicas e se depositem mais facilmente, tornando o ar mais puro. Esse efeito é mais duradouro que a precipitação de chuvas, cuja ocorrência é temporária, de modo que a variável “umidade” apresenta a maior influência inversa na concentração de MP_{10} no ar atmosférico que a variável “precipitação”.

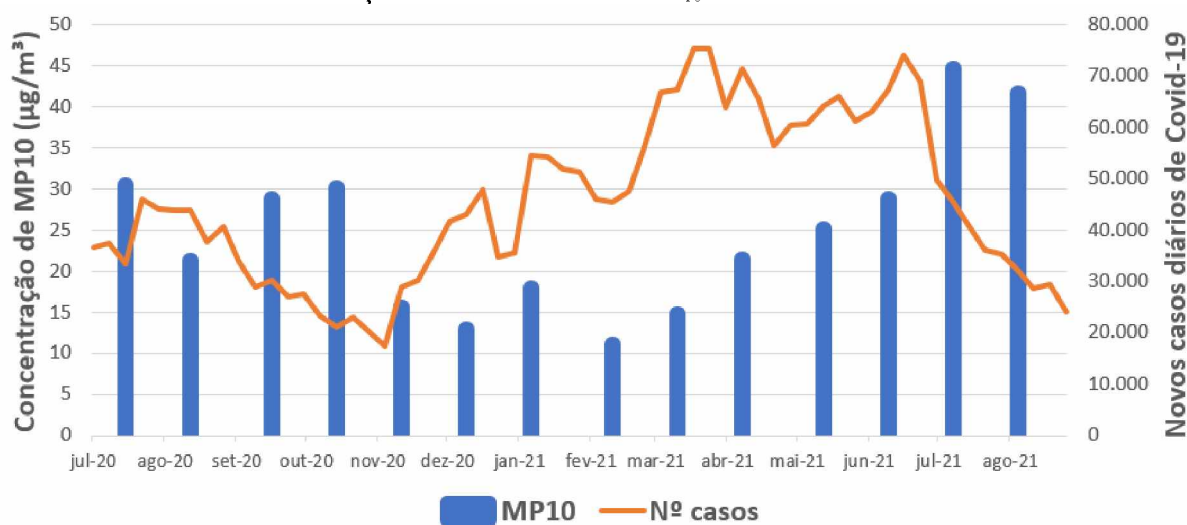
Já a correlação direta entre a velocidade do vento e a concentração do MP_{10} também pode ser explicada pela capacidade de ventos intensos trazerem poluentes do Distrito Industrial para o centro da cidade.

4.3.6 Comparação das médias mensais de MP₁₀ com períodos da pandemia de Covid-19

A Figura 65 mostra uma comparação entre o número de novos casos de Covid-19 registrados diariamente no Brasil (média móvel de sete dias) com a concentração média mensal de MP₁₀. A análise gráfica sugere que o aumento no número de novos casos diários, entre dezembro/2020 e junho/2021, contribuiu para a redução da circulação de veículos – seja pela aplicação de normas mais rigorosas ou pela conscientização das pessoas – e, conseqüentemente, da concentração de MP₁₀ no ar atmosférico.

A tendência inversa também pôde ser observada. Com a redução acentuada do número de casos em julho e agosto/2021, a concentração de MP₁₀ voltou a subir a níveis não antes registrados desde o início da pandemia.

Figura 65 - Comparação entre o número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil com a concentração média mensal de MP₁₀ em Uberlândia-MG.



Fonte: Worldometer (2021).

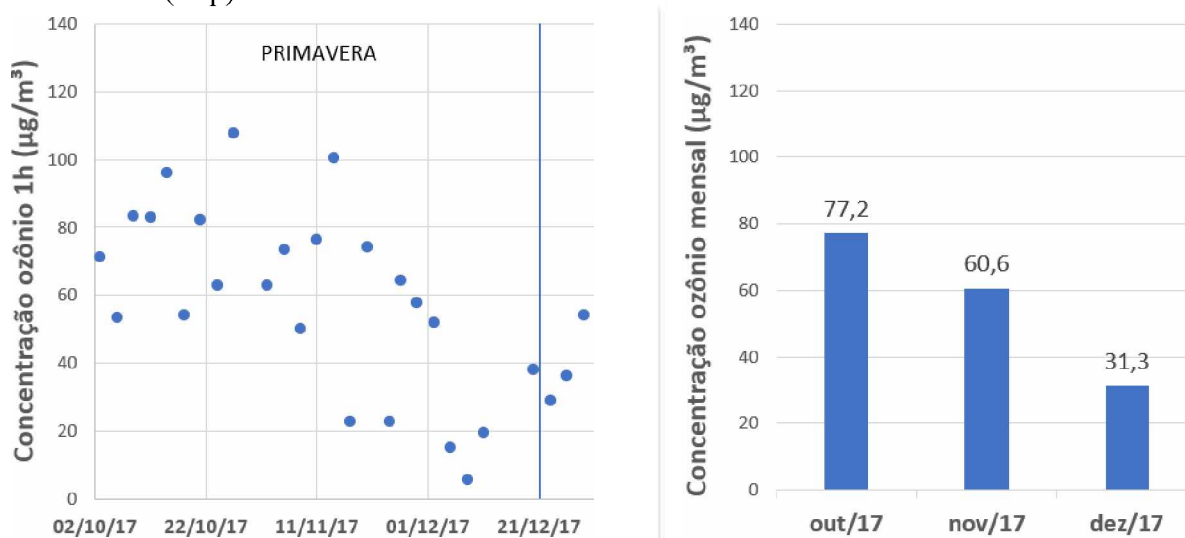
A correlação calculada entre o total mensal de novos casos de Covid-19 no Brasil e a concentração média mensal de MP₁₀ em Uberlândia-MG foi de -0,2420, indicando a relação inversa entre eles, porém em nível considerado estatisticamente desprezível. Similarmente ao que foi observado com relação ao PTS, essa correlação desprezível deve ser interpretada com cautela, por conta da possibilidade de subnotificação do número de casos, o que poderia afetar diretamente o cálculo de correlação entre duas variáveis.

4.4 CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO (O₃)

4.4.1 Medições preliminares de ozônio

As pesquisas preliminares de medição de ozônio se iniciaram em outubro de 2017. Durante três meses, foram realizadas 27 medições em intervalos aproximados de três dias entre si. A maioria das medições ocorreu na estação da primavera. Os resultados, tanto das concentrações médias horárias quanto das médias mensais (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$), são mostrados na Figura 66.

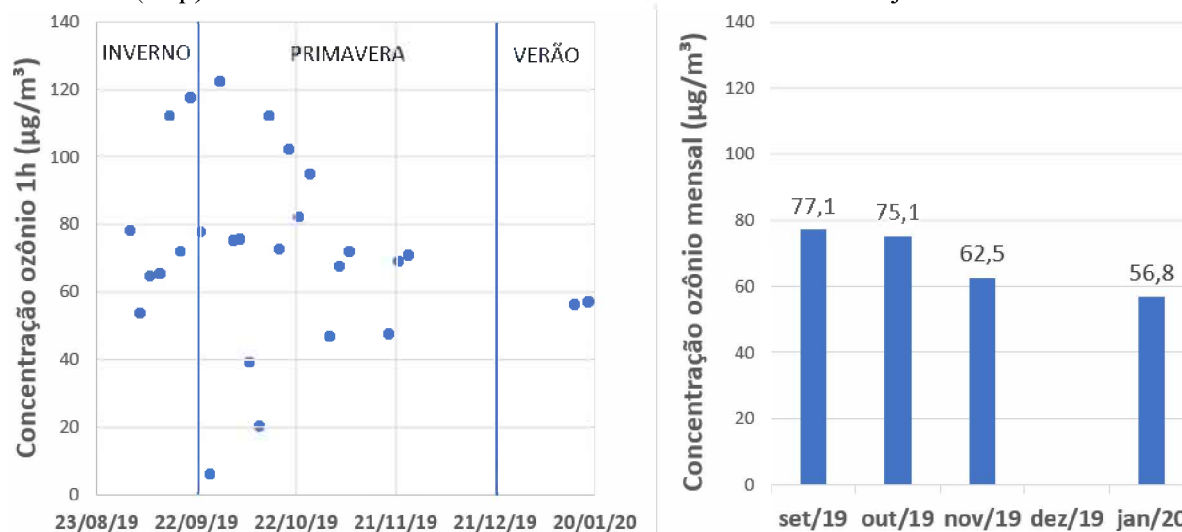
Figura 66 - Resultados de medições preliminares de concentração de ozônio média horária (esq.) e mensal em Uberlândia-MG entre outubro e dezembro/2017.



Fonte: autor (2021).

Dois anos depois, as medições preliminares foram retomadas. Foram realizadas 25 medições entre setembro e novembro de 2019, além de duas medições em janeiro de 2020. Novamente a maioria das medições ocorreu na estação da primavera. Os resultados são mostrados na Figura 67.

Figura 67 - Resultados de medições preliminares de concentração de ozônio média horária (esq.) e mensal em Uberlândia-MG entre setembro/2019 e janeiro/2020.



Fonte: autor (2021).

4.4.2 Medições efetivas de ozônio

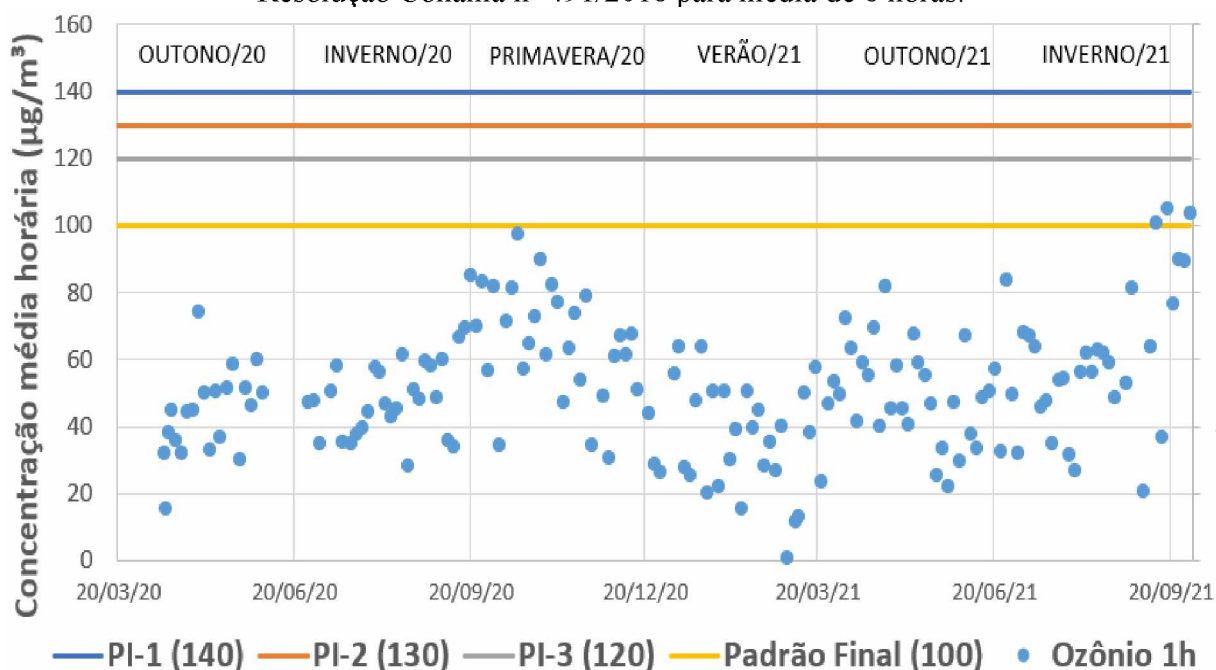
No presente trabalho, as medições efetivas ocorreram, de forma praticamente ininterrupta, entre 13/4/2020 e 30/9/2021. Nesse intervalo de 17 meses, foram realizadas 168 medições em intervalos aproximados de três dias entre si, englobando todas as estações do ano.

A Figura 68 apresenta os resultados encontrados de concentração de ozônio média de 1 hora no ar atmosférico. Eles foram comparados com os limites estipulados na Resolução Conama nº 491/2018 (vide Tabela 2) para as médias de 8 horas, uma vez que essa norma legal não estabelece limites para médias de 1 hora.

Os padrões intermediários de concentrações médias de 8 horas de ozônio são: 140 µg/m³ (PI-1), 130 µg/m³ (PI-2) e 120 µg/m³ (PI-3), enquanto o padrão final é 100 µg/m³⁹. Observa-se que, no período analisado, as concentrações médias horárias de ozônio se mantiveram abaixo do padrão final. As três únicas exceções ocorreram em setembro de 2021, quando esse limite foi ultrapassado em 12/9/2021 (101,1 µg/m³), 18/9/2021 (105,3 µg/m³) e 30/9/2021 (104,0 µg/m³).

9 A Resolução Conama nº 3/1990 (revogada) estabelecia como padrão secundário e primário de qualidade do ar o limite de 160 µg/m³ para a concentração de ozônio na média de 1 hora.

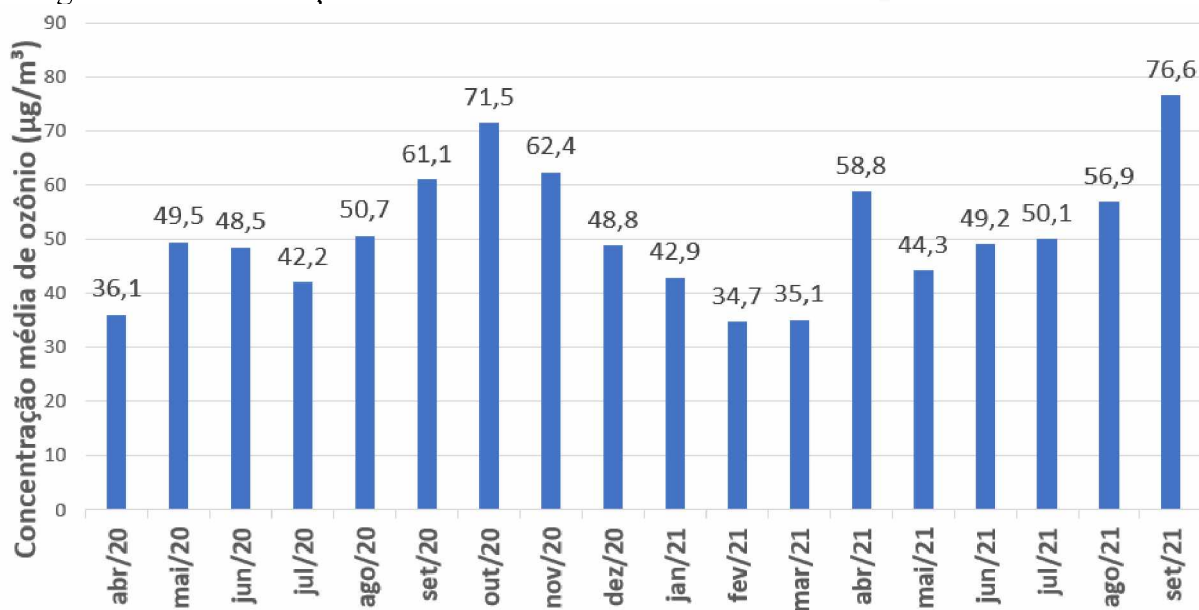
Figura 68 - Concentração média horária de ozônio em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021, em comparação com os Padrões Intermediários 1, 2 e 3 e com o Padrão Final definidos na Resolução Conama nº 491/2018 para média de 8 horas.



Fonte: autor (2021).

A Figura 69 mostra a concentração média mensal de ozônio em Uberlândia-MG, calculada durante o período analisado.

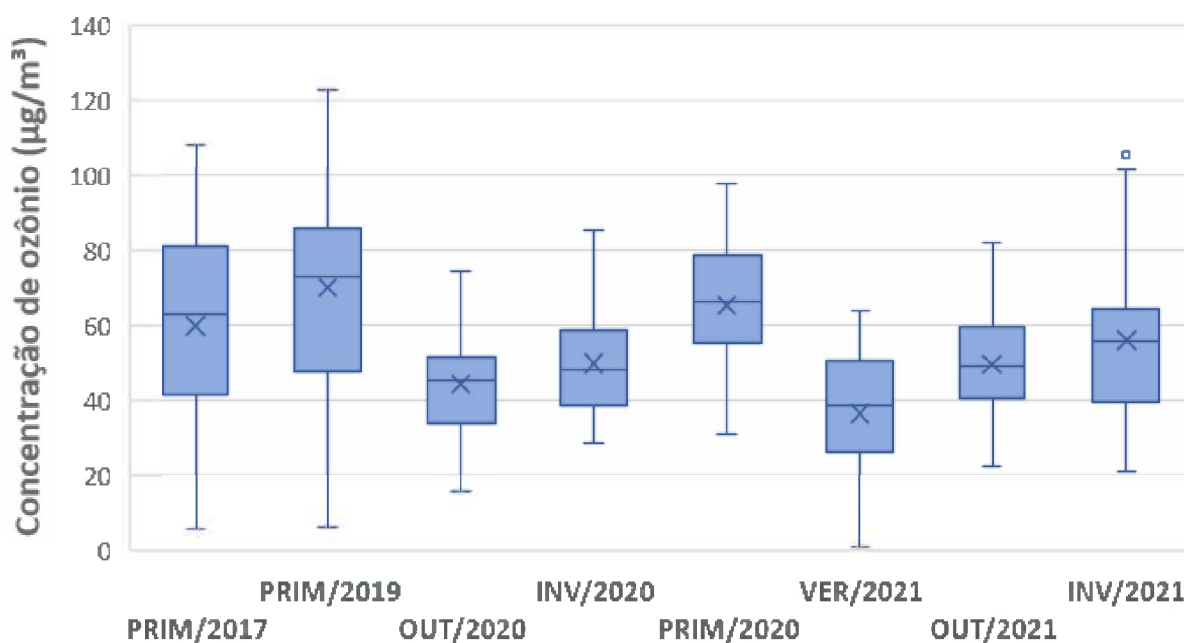
Figura 69 - Concentração média mensal de ozônio em Uberlândia-MG entre 2020 e 2021.



Fonte: autor (2021).

A Figura 70 traz uma análise por gráfico *box plot* das concentrações de ozônio reunidas por estação do ano, incluindo as primaveras de 2017 e 2019, por apresentarem o maior número de pontos entre os dados das medições preliminares. Observa-se que a primavera foi a estação do ano que apresentou a maior média do período analisado, registrando 69,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2019, 65,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2020 e 59,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2017. A menor média foi registrada na estação do verão de 2021: 36,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. É possível que a baixa concentração do poluente esteja relacionada com o fluxo ascendente de ar quente, que tipicamente ocorre nessa estação do ano, renovando o ar atmosférico e melhorando sua qualidade.

Figura 70 - Gráfico *box plot* de concentração de ozônio por estação do ano.



Fonte: autor (2021).

A título de registro para trabalhos futuros, a Tabela 7 reúne os dados coletados nesta pesquisa (de 2017 a 2021), apresentando as médias mensais de concentração de ozônio em Uberlândia-MG em todo esse período.

Tabela 7 - Médias mensais de concentração de ozônio em Uberlândia-MG entre 2017 e 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

DATA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77,24	60,62	31,34
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	-	-	-	-	-	-	-	-	77,11	75,14	62,49	-
2020	56,76	-	-	36,13	49,52	48,52	42,16	50,70	61,13	71,46	62,39	48,81
2021	42,93	34,69	35,13	58,79	44,33	49,16	50,13	56,95	76,55	-	-	-

Fonte: autor (2021).

4.4.3 Correlação das médias mensais de ozônio com variáveis atmosféricas

Os valores médios mensais de concentração de ozônio medidos neste trabalho (Figura 69) foram comparados com as variáveis atmosféricas históricas médias mensais (Figuras 38 a 42)¹⁰. A Tabela 8 apresenta a correlação calculada entre essas variáveis.

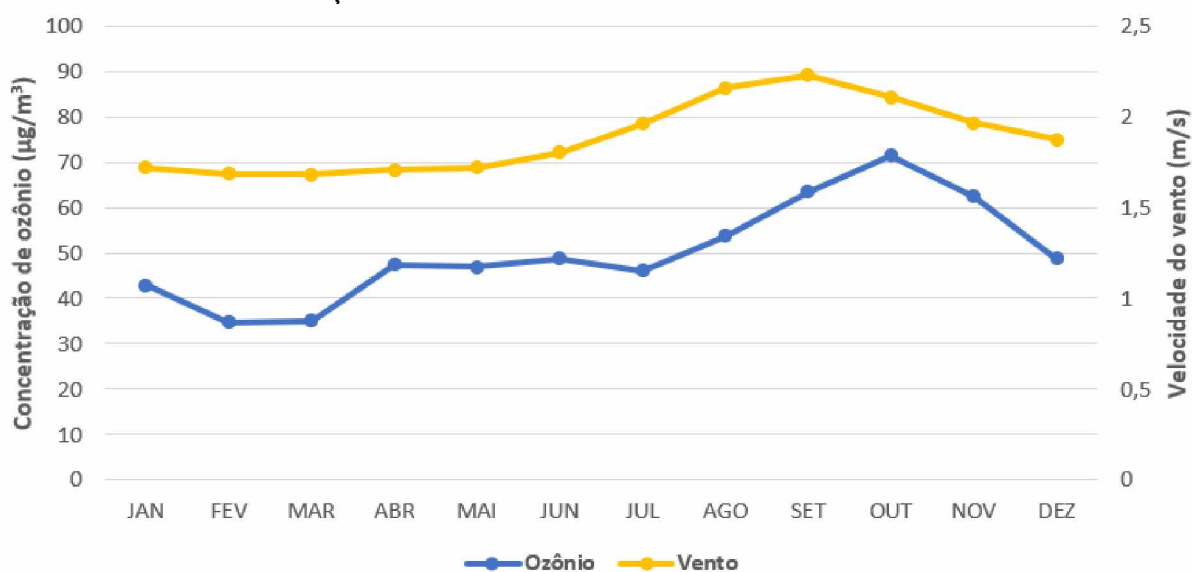
Tabela 8 - Coeficientes de correlação entre a concentração de ozônio e variáveis atmosféricas.

	Ozônio	Precipitação	Umidade	Temperatura	Pressão	Vento
Ozônio	1,0000	-0,1971	-0,5370	0,3098	-0,0305	0,8103
Precipitação	-0,1971	1,0000	0,8062	0,6065	-0,9116	-0,3492
Umidade	-0,5370	0,8062	1,0000	0,2559	-0,7129	-0,8125
Temperatura	0,3098	0,6065	0,2559	1,0000	-0,8221	0,2023
Pressão	-0,0305	-0,9116	-0,7129	-0,8221	1,0000	0,2173
Vento	0,8103	-0,3492	-0,8125	0,2023	0,2173	1,0000

Fonte: autor (2021).

A variável independente atmosférica que demonstrou forte correlação com a concentração de ozônio foi a velocidade do vento, com um índice de 0,8103 (Figura 71).

Figura 71 - Gráfico comparativo entre valores históricos de velocidade do vento e concentração de ozônio no ar atmosférico em Uberlândia-MG.

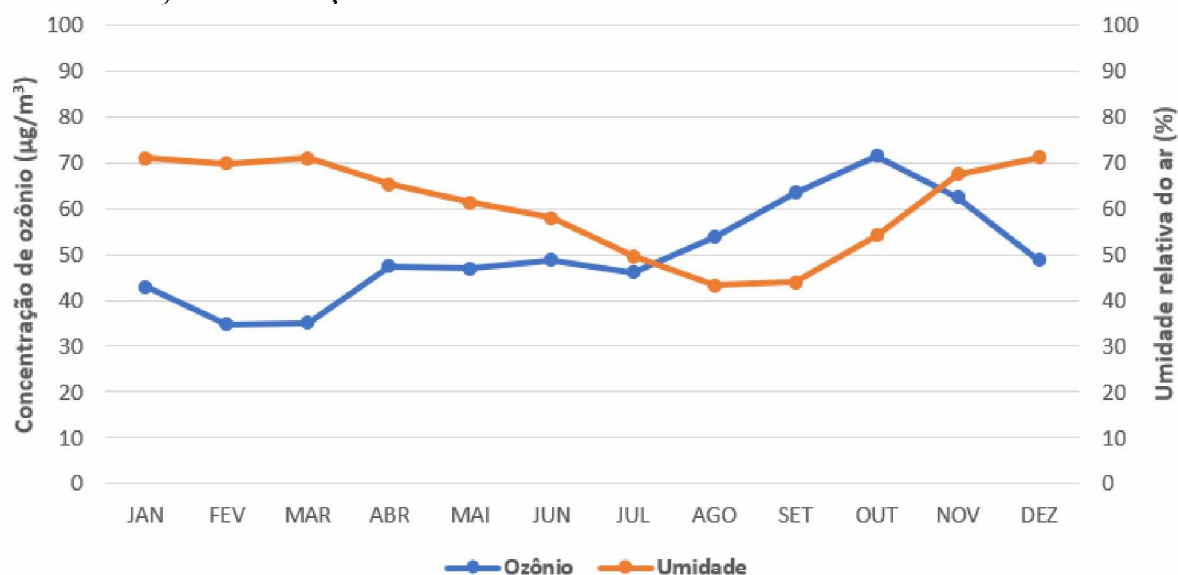


Fonte: Inmet (2021) e autor (2021).

¹⁰ Conforme esclarecido no item 4.1.7, o parâmetro radiação solar foi excluído por ter apresentado perfil mensal indefinido e estatisticamente não confiável.

Outro parâmetro que merece destaque é a umidade relativa do ar atmosférico (Figura 72), por apresentar correlação moderada com a concentração de ozônio (-0,5370), porém com um fator bastante inferior ao registrado nas comparações com os poluentes PTS e MP₁₀.

Figura 72 - Gráfico comparativo entre valores históricos de umidade relativa do ar (2003-2021) e concentração média de ozônio no ar atmosférico em Uberlândia-MG.



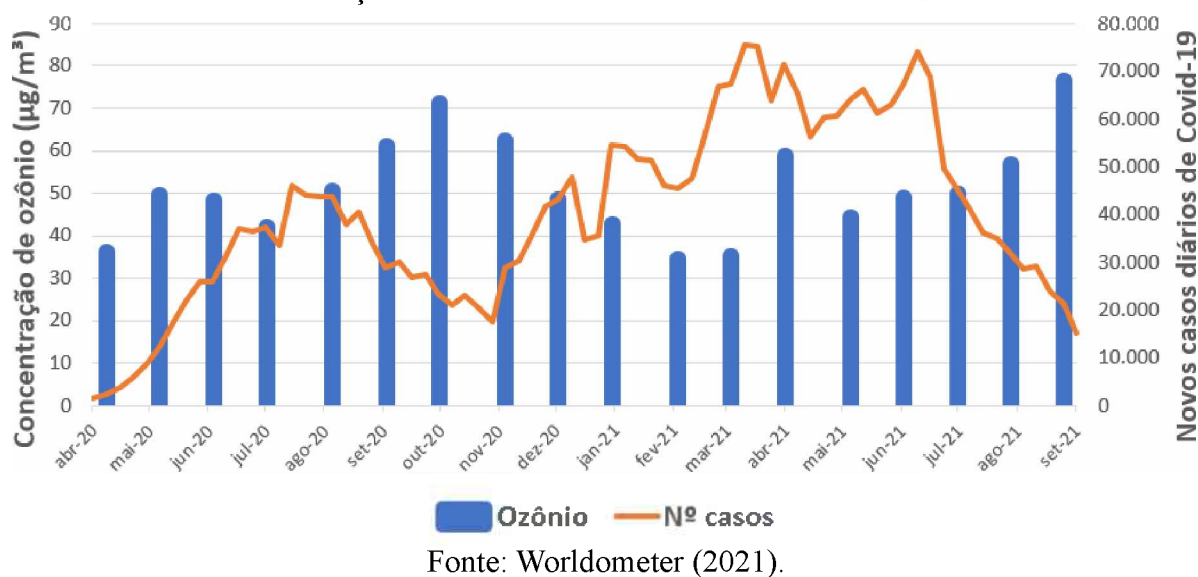
Fonte: Inmet (2021) e autor (2021).

4.4.4 Comparação das médias mensais de ozônio com períodos da pandemia de Covid-19

A Figura 73 mostra uma comparação entre o número de novos casos de Covid-19 registrados diariamente no Brasil (média móvel de sete dias) com a concentração média mensal de ozônio. A análise gráfica sugere que a redução do número de novos casos diários entre agosto e novembro de 2020 pode ter influenciado no aumento da concentração de ozônio no ar atmosférico no mesmo período. O mesmo padrão foi observado entre julho e setembro de 2021 (redução no número de casos e aumento na concentração média de ozônio).

O aumento do número de casos diários entre novembro/2020 e março/2021 também coincidiu com uma redução na concentração de ozônio média mensal. Por outro lado, não se descarta a hipótese de que essas tendências podem representar apenas oscilações sazonais. A ausência de dados históricos inviabiliza uma análise conclusiva sobre esse aspecto.

Figura 73 - Comparação entre o número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil com a concentração média mensal de ozônio em Uberlândia-MG.



A correlação calculada entre o total mensal de novos casos de Covid-19 no Brasil e a concentração média mensal de ozônio em Uberlândia-MG foi de $-0,3451$, indicando a relação inversa e fraca entre eles. Porém, como mencionado nos casos do PTS e do MP_{10} , essa fraca correlação deve ser interpretada com cautela. Como existe a possibilidade de subnotificação do número de casos, o registro incoerente poderia afetar diretamente o cálculo de correlação entre duas variáveis.

O presente trabalho permitiu que se chegasse às conclusões expostas a seguir.

Quanto aos dados meteorológicos:

- A estação meteorológica de Uberlândia-MG, situada no campus Santa Mônica da UFU, instalada em 2003, tem funcionado de forma bastante estável, operando entre 99% e 100% dos períodos anuais desde 2009 até o presente;
- O período de maior estiagem do ano em Uberlândia-MG se concentra no inverno, quando a precipitação total mensal é inferior a 15 mm de chuva, em média, entre junho e agosto. Consequentemente, o ar mais seco do ano é registrado em agosto e setembro, quando a umidade relativa média atinge valores próximos a 43%.
- Já o período chuvoso se estende de novembro a março, com precipitação total mensal alcançando, em média, entre 160 e 285 mm de chuva. Nesse intervalo, a umidade média do ar atmosférico gira em torno de 70%.

Sobre a concentração de Partículas Totais em Suspensão no ar atmosférico:

- Na comparação com os limites definidos na Resolução Conama nº 491/2018, a concentração de PTS média diária se manteve abaixo do Padrão Final ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) em todas as 90 medições válidas de 24 horas realizadas entre 3/6/2020 e 28/8/2021, indicando que, nesse critério, o município permaneceu em total conformidade com a norma durante esse período, indicando uma boa qualidade do ar;
- A média anual de PTS em 2020 ($80,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$) incluiu apenas os meses de junho, julho e agosto – período de inverno, quando já é esperada uma concentração mais elevada

desse poluente. Assim, mesmo tendo ultrapassado levemente o Padrão Final da média anual do Conama ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), essa informação deve ser analisada com cautela. Já a média anual de 2021, incluindo os meses de janeiro a agosto, ficou em $75,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, abaixo do limite da norma;

- Nos meses de julho/2020 a abril/2021, a concentração de PTS medida ficou abaixo dos respectivos meses na comparação com o registro histórico mensal de 2003 a 2018. No período de maior restrição da pandemia de Covid-19, observou-se que a qualidade do ar atmosférico com relação ao PTS melhorou, em média, 21,2% na comparação com os dados históricos;
- Por outro lado, após o relaxamento das restrições que haviam sido impostas devido à pandemia de Covid-19, a qualidade do ar atmosférico voltou a piorar. No inverno de 2020 (período de fortes restrições), registrou-se uma concentração de PTS média de $81,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já no inverno de 2021 (após o relaxamento das restrições), a concentração de PTS média foi de $115,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando um aumento de 41,5% com relação à mesma estação do ano anterior.
- Analisando-se, ainda, as estações do ano no período das medições realizadas, observou-se que a menor média de concentração do poluente foi registrada no verão de 2021 ($45,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e a maior, no inverno de 2021 ($115,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de forma condizente com a literatura;
- Os parâmetros atmosféricos que apresentaram maior influência no resultado de concentração de PTS no ar foram: umidade relativa do ar (de forma inversa), velocidade do vento (de forma direta) e precipitação de chuvas (de forma inversa), com índices de correlação iguais a $-0,9754$, $0,8842$ e $-0,7037$, respectivamente. A umidade presente no ar atmosférico torna as partículas em suspensão mais pesadas por serem higroscópicas, intensificando a sua deposição no solo. Por ter um efeito mais duradouro, a alta umidade exerce maior influência na qualidade do ar que a precipitação de chuvas, cujo efeito é instantâneo.

Sobre a concentração de Partículas Inaláveis (MP_{10}) no ar atmosférico:

- Na comparação com os limites definidos na Resolução Conama nº 491/2018, a concentração de MP_{10} média diária se manteve abaixo do Padrão Final ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) em 96,4% das medições de 24 horas realizadas entre 3/7/2020 e 7/8/2021, indicando uma boa qualidade do ar. As quatro únicas ultrapassagens do Padrão Final (entre 111

medições válidas) ocorreram no inverno de 2021, porém ainda se mantiveram abaixo do Padrão Intermediário 3, ou seja, em conformidade com a norma legal;

- As médias anuais de MP_{10} em 2020 ($22,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e em 2021 ($25,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ultrapassaram o Padrão Final da média anual do Conama ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), porém se mantiveram abaixo dos Padrões Intermediários 1, 2 e 3 (de 40 , 35 e $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente)¹¹ e abaixo de todos os valores da série histórica de 2003 a 2017;
- Na comparação com o registro mensal de 2003 a 2017, a concentração de MP_{10} em todo o período analisado (entre julho/2020 e agosto/2021) esteve abaixo dos valores médios históricos. Entre julho/2020 e junho/2021, a melhora na qualidade do ar atmosférico de Uberlândia-MG referente ao poluente MP_{10} foi de 58,1%;
- Em contrapartida, após a flexibilização das restrições, a qualidade do ar atmosférico caiu drasticamente. No inverno de 2020 (período de fortes restrições), registrou-se uma concentração de MP_{10} média de $29,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já no inverno de 2021 (após o relaxamento das restrições), a concentração de MP_{10} média foi de $41,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando um aumento de 39,1% com relação à mesma estação do ano anterior;
- Ainda com relação às estações do ano no período das medições realizadas, constatou-se que a menor média de concentração do poluente foi registrada no verão de 2021 ($13,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e a maior, no inverno de 2021 ($41,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de forma condizente com a literatura;
- Similarmente ao observado com o PTS, os parâmetros atmosféricos que apresentaram maior influência no resultado de concentração de MP_{10} no ar foram: umidade relativa do ar (de forma inversa) e velocidade do vento (de forma direta), com fortes correlações, iguais a $-0,8467$ e $0,8287$, respectivamente.

Sobre a concentração de ozônio no ar atmosférico:

- Na comparação com os limites definidos na Resolução Conama nº 491/2018, a concentração de ozônio se manteve abaixo do Padrão Final ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, na média de 8 horas) em 98,2% das medições efetivas de 1 hora realizadas, indicando uma boa qualidade do ar. As três únicas ultrapassagens (entre 168 medições válidas) ocorreram no inverno e na primavera de 2021¹², porém ainda se mantiveram abaixo do Padrão Intermediário 3, ou seja, em conformidade com a norma legal;

11 Registra-se que o padrão em vigor na data de elaboração desse trabalho é o Intermediário 1.

12 Nota: o Conama não estabelece padrão de referência para a concentração média anual de ozônio.

- Os parâmetros atmosféricos que apresentaram maior influência no resultado de concentração de ozônio no ar foram: velocidade do vento (de forma direta) e umidade relativa do ar (de forma inversa), com índices de correlação iguais a 0,8103 (forte) e - 0,5370 (moderada), respectivamente;
- A ausência de dados históricos de longo prazo inviabiliza uma análise conclusiva sobre tendências de aumento ou redução da concentração de ozônio no ar atmosférico de Uberlândia-MG ao longo dos anos.

Com relação à pandemia de Covid-19, a análise dos dados sugere que o aumento do número de novos casos diários no Brasil tenha contribuído para a redução da concentração de PTS, MP_{10} e ozônio no ar atmosférico em Uberlândia-MG, provavelmente pela desaceleração das atividades econômicas e sociais e consequente redução da circulação de veículos no município, durante os períodos de restrições mais rigorosas. A tendência inversa também pôde ser observada. Com a redução acentuada do número de casos em julho e agosto/2021, a concentração desses três poluentes voltou a subir, atingindo (no caso do PTS e do MP_{10}) níveis não antes registrados desde o início da pandemia.

A correlação calculada entre o total mensal de novos casos de Covid-19 no Brasil e a concentração média mensal dos poluentes no ar atmosférico de Uberlândia-MG foi de -0,5139 para o PTS (moderada), -0,2420 para o MP_{10} (desprezível) e -0,3451 para o ozônio (fraca). Apesar de nenhuma das correlações ter sido classificada como forte, o resultado deve ser interpretado com cautela. Uma eventual subnotificação do número de novos casos diários da doença afetaria diretamente o cálculo de correlação entre as variáveis. Ademais, o fato de as três correlações terem apresentado valor negativo é um indicativo da relação inversa entre o número de novos casos e a concentração de todos os poluentes analisados, sugerindo que as notícias veiculadas na mídia relacionadas à propagação da doença podem ter influenciado as pessoas a ficarem em casa.

Os decretos municipais com o intuito de restringir e, posteriormente, flexibilizar a circulação de veículos e pessoas foram editados em diferentes momentos da pandemia. Eles certamente tiveram um efeito inicial sobre a população. Porém, o efeito psicológico do aumento do número de casos da doença parece ter influenciado ainda mais a população a se manter em casa, reduzindo a circulação de veículos e, consequentemente, melhorando a qualidade do ar atmosférico, inclusive nos momentos em que os mesmos decretos estavam em vigor, sem sofrer alterações.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A Resolução Conama nº 491/2018 estabelece o prazo limite de 19/11/2021 para que os órgãos ambientais estaduais e distrital elaborem um Plano de Controle de Emissões Atmosféricas de cada localidade. Os órgãos ambientais deverão também produzir anualmente e publicar um Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar. Para isso, é indispensável o monitoramento constante de todos os poluentes definidos na resolução.

Como não se pode definir um plano visando à melhoria do ar atmosférico sem que os parâmetros sejam sequer conhecidos, sugere-se que (minimamente) seja mantido o monitoramento do PTS, do MP₁₀ e do ozônio e que (desejavelmente) seja iniciada a medição periódica dos demais parâmetros citados na resolução (MP_{2,5}, SO₂, NO₂, fumaça e CO), conforme as referências temporais estabelecidas.

É importante expandir a área de monitoramento, realizando-se as medições também em outras áreas da cidade, como no distrito industrial e em outros bairros com maior fluxo de pessoas e veículos, para que se possa ter um cenário mais abrangente da qualidade de ar no município.

Os equipamentos atualmente empregados na medição de PTS e MP₁₀ são antigos (quase 20 anos de uso) e empregam tecnologia ultrapassada, demandando intenso esforço operacional e longos períodos de tempo para se obter os resultados de concentração dos poluentes. Atualmente, existem no mercado equipamentos mais modernos, capazes de medir de forma automática os parâmetros listados na Resolução Conama nº 491/2018. O emprego dessa tecnologia apresentaria ainda, como vantagem, a possibilidade de se transmitir a um servidor na *internet* os resultados de concentração dos poluentes, os quais seriam disponibilizados em tempo real para as autoridades públicas e para a população em geral. A aquisição desses novos equipamentos poderia ser pleiteada em órgãos públicos ou privados e a operação seria realizada por alunos de graduação e de pós-graduação, sob tutela dos professores da Universidade Federal de Uberlândia.

A&D. **HR-Series Instruction Manual. Precision Electronic Balance HR-60 HR-120 HR-200 HR-202 HR-300.** Organização de A&D Co. Ltd., International Division, Tóquio, [s.d.]. Disponível em: <<https://scalenet.com/pdf/HR-IM.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

AEROQUAL. **Portable Air Quality Monitors.** Auckland, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.aeroqual.com/wp-content/uploads/Aeroqual-Portable-Monitors-Long-Brochure-LR.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. **Atmosfera, Tempo e Clima.** Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRITO, G F S; SODRÉ, F F; ALMEIDA, F V. O Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar. **Rev. Virtual Quim**, v. 10, n. 5, 2018. Disponível em: <<http://rvq.s bq.org.br>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

CETESB. **Poluentes / Qualidade do Ar.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Conama n° 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p. 3–6, 1989.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Conama n° 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, v. 24, p. 342–346, 1990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n° 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p. 7, 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>.

DUARTE, Renata Lopes; HENRIQUE, César; ROCHA, Barra. Os efeitos do isolamento social e da pandemia de COVID-19 na qualidade do ar ao redor do mundo. In: Congresso Latino-americano de Desenvolvimento Sustentável, **Anais...2021**. Disponível em: <<https://www.eventoanap.org.br/data/inscricoes/8887/form4475251910.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

ENERGÉTICA. **AGV PTSCVV - Amostrador de Grande Volume (AGV) para Partículas Totais em Suspensão (PTS) com Controle Volumétrico da Vazão (CVV): Manual de Operação**. Organização de José Walderley Coêlho Dias. Rio de Janeiro, 2016a. Disponível em: <www.energetica.ind.br>. Acesso em: 24 ago. 2021.

ENERGÉTICA. **AGV MP10 - Amostrador de Grande Volume (AGV) para Partículas de até 10 µm (MP10): Manual de Operação** Organização de José Walderley Coêlho Dias. Rio de Janeiro, 2016b.

EPA. **Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>>. Acesso em: 24 ago. 2021a.

EPA. **Ground-level Ozone Basics**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#wwh>>. Acesso em: 24 ago. 2021b.

FERNANDES, Marcus Vinícius de Oliveira. **Simulação da concentração de material particulado inalável de origem veicular em uma interseção sinalizada de Uberlândia-MG**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

HINDS, William. **Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1982.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **INMET - Tempo**. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507>>. Acesso em: 8 ago. 2021.

KAR, Sayanti et al. Impact of coronavirus (Covid-19) outbreak on society, air quality, and economy in india: A study of three “p”s of sustainability in India. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 5, p. 1–27, 1 mar. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13052873>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

LIAN, Xinbo et al. Impact of city lockdown on the air quality of COVID-19-hit of Wuhan city. **Science of the Total Environment**, v. 742, p. 140556, 10 nov. 2020.

LIMA, Euclides Antônio Pereira. **Um estudo sobre a qualidade do ar de Uberlândia: material particulado em suspensão**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LIRA, Taisa Shimosakai de. **Modelagem e Previsão da Qualidade do Ar na Cidade de Uberlândia-MG**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

LISBOA, Henrique de Melo. **Controle da Poluição Atmosférica**. 2ª ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MARCONI. **Estufa de Secagem com Renovação/Circulação de Ar MA035/1 | Marconi – Equipamentos para Laboratório**. Disponível em: <<https://www.marconi.com.br/produto/170/estufa-de-secagem-com-renovacaocirculacao-de-ar>>. Acesso em: 1 dez. 2021.

MORETTIN, Pedro A.; BUSSAB, Wilton de O. **Estatística Básica**. 9ª ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal : The Journal of Medical Association of Malawi**, v. 24, n. 3, p. 69, 2012. Disponível em: <[/pmc/articles/PMC3576830/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3576830/)>. Acesso em: 1 dez. 2021.

NASA. **Airborne Nitrogen Dioxide Plummets Over China**. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china>>. Acesso em: 27 jun. 2021a.

NASA. **Airborne Particle Levels Plummet in Northern India**. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/146596/airborne-particle-levels-plummet-in-northern-india>>. Acesso em: 27 jun. 2021b.

OMS. **Air pollution**. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1>. Acesso em: 22 maio. 2021.

ONU. **Nações Unidas: um ano do combate à pandemia - Nações Unidas - ONU Portugal**. Disponível em: <<https://unric.org/pt/nacoes-unidas-um-ano-do-combate-a-pandemia/>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

SILVA, Isaac Francisco da. **Determinação da concentração de material particulado na região central de Uberlândia**. 2018. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de Uberaba, Uberaba, 2018.

UBERLÂNDIA. **Decreto nº 18.523, de 27 de fevereiro de 2020**. Institui o Comitê Municipal de Enfrentamento ao Covid-19 e designa membros. Uberlândia: Prefeitura Municipal, 2020a. Disponível em: <www.uberlandia.mg.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2021.

UBERLÂNDIA. **Decreto nº 18.550, de 19 de março de 2020**. Dispõe, no âmbito da Administração Pública Municipal, acerca de medidas temporárias de prevenção ao novo coronavírus – Covid-19. Uberlândia: Prefeitura Municipal, 2020b. Disponível em: <www.uberlandia.mg.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2021.

UBERLÂNDIA. **Decreto nº 18.553, de 20 de março de 2020**. Declara situação de emergência no município de Uberlândia e define outras medidas para o enfrentamento ao novo coronavírus – Covid-19. Uberlândia: Prefeitura Municipal, 2020c. Disponível em: <www.uberlandia.mg.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2021.

UBERLÂNDIA. **Decreto nº 18.592, de 20 de abril de 2020.** Altera o Decreto nº 18.553, de 20 de março de 2020 que “declara situação de emergência no município de Uberlândia e define outras medidas para o enfrentamento ao novo coronavírus – Covid-19” e dá outras providências. Uberlândia: Prefeitura Municipal, 2020d. Disponível em: <www.uberlandia.mg.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2021.

UBERLÂNDIA. **Decretos e documentos.** Uberlândia: Prefeitura Municipal, 2021a. Disponível em: <<https://www.uberlandia.mg.gov.br/coronavirus/decretos-e-documentos/>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

UBERLÂNDIA. **Deliberação nº 12, de 19 de agosto de 2021.** Altera a Deliberação nº 020, de 7 de outubro de 2020 e suas alterações, que “dispõe sobre o plano municipal de funcionamento das atividades econômicas durante o período de pandemia de Covid-19 e dá outras providências” e dá outras providências. Uberlândia, 2021b. Disponível em: <https://docs.uberlandia.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/08/DELIBERAÇÃO-Nº-12_2021.docx.pdf>.

WORLDOMETER. **Covid-19 Coronavirus Pandemic. Reported Cases and Deaths by Country or Territory.** Disponível em: <<https://www.worldometers.info/coronavirus/country/brazil/>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

CAPÍTULO



ANEXO

Tabela 9 - Número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil de março a dezembro/2020.

Dia	Mar/20	Abr/20	Mai/20	Jun/20	Jul/20	Ago/20	Set/20	Out/21	Nov/20	Dez/20
1	0	1.117	5.919	12.247	46.712	45.392	42.659	36.157	10.100	50.909
2	0	1.076	5.097	28.936	48.105	25.800	46.934	33.431	8.501	49.863
3	0	1.146	4.751	28.633	42.223	16.641	43.773	26.310	11.843	50.434
4	1	1.222	6.633	30.925	37.923	51.603	51.194	8.456	23.976	46.884
5	4	852	6.935	30.830	26.051	55.676	30.168	11.946	22.294	43.209
6	6	926	10.503	27.075	20.229	54.615	14.521	41.906	21.428	26.363
7	6	1.661	9.888	18.912	45.305	50.230	10.273	31.553	19.814	20.371
8	6	2.210	10.222	15.654	44.571	49.970	14.279	27.750	10.554	51.088
9	0	1.930	10.611	32.091	42.619	23.010	35.816	27.444	10.917	53.453
10	9	1.781	6.760	32.913	45.048	22.048	40.557	26.749	25.012	53.347
11	18	1.089	5.632	30.412	39.023	52.160	43.718	12.342	48.331	54.428
12	25	1.442	9.258	25.982	24.831	55.155	33.523	8.429	33.207	43.900
13	21	1.261	11.385	21.704	20.286	60.091	14.768	10.220	29.070	21.825
14	23	1.832	13.944	17.110	41.857	50.644	15.155	27.235	38.307	25.193
15	79	3.058	15.305	20.647	39.924	41.576	36.653	28.523	14.134	42.889
16	34	2.105	14.919	34.918	45.403	23.101	36.820	30.914	13.371	70.574
17	57	3.257	7.938	32.188	34.177	19.373	36.303	24.062	35.294	69.826
18	137	2.917	13.140	22.765	28.532	47.784	39.797	10.982	34.091	52.544
19	193	2.055	17.408	54.771	23.529	49.298	33.057	15.383	35.918	50.177
20	283	1.927	19.951	34.666	20.257	45.323	16.389	23.227	38.397	25.445
21	224	2.498	18.508	17.459	41.008	30.355	13.439	24.818	32.622	25.019
22	418	2.678	20.803	21.432	67.860	50.032	33.536	24.858	18.615	55.202
23	345	3.735	16.508	39.436	59.961	23.421	33.281	30.026	16.207	46.696
24	310	3.503	15.813	42.725	55.891	17.078	32.817	26.979	31.100	60.076
25	232	5.514	11.687	39.483	51.147	47.134	31.911	13.493	47.898	22.967
26	482	3.379	16.324	46.860	24.578	47.161	28.378	15.726	37.614	17.246
27	502	4.613	20.599	38.693	23.284	44.235	14.318	29.787	34.130	18.479
28	486	5.385	26.417	30.476	40.816	43.412	13.155	28.629	51.922	20.548
29	353	6.276	26.928	24.052	69.074	41.350	32.058	26.106	24.468	58.718
30	323	7.218	33.274	33.846	57.837	16.158	33.413	22.282	21.138	55.649
31	1.138	-	15.760	-	52.383	45.961	-	18.947	-	56.773

Fonte: Worldometer (2021).

Tabela 10 - Número de novos casos diários de Covid-19 no Brasil de janeiro a setembro/2021.

Dia	Jan/21	Fev/21	Mar/21	Abr/21	Mai/21	Jun/21	Jul/21	Ago/21	Set/21
1	24.605	24.591	35.742	91.097	66.964	78.926	65.163	20.503	27.345
2	15.827	54.096	59.925	70.238	28.935	95.601	65.165	15.143	26.280
3	17.341	56.002	71.704	43.515	24.619	83.391	54.556	32.316	25.565
4	20.006	56.873	75.102	31.359	77.359	37.936	27.783	40.716	21.804
5	56.648	50.872	75.495	28.645	73.295	66.017	22.703	40.054	12.915
6	63.430	50.630	69.609	86.979	73.380	39.637	62.504	42.159	9.154
7	87.843	26.845	80.508	92.625	78.886	37.156	54.022	43.033	13.645
8	52.035	23.439	32.321	86.652	63.430	52.911	53.725	13.893	14.430
9	62.290	51.486	70.764	93.317	38.911	85.748	57.737	12.085	30.891
10	29.792	59.602	79.876	71.832	25.200	88.092	48.504	34.885	15.951
11	25.822	54.742	75.412	37.017	72.715	85.149	20.937	32.443	14.314
12	64.025	51.546	85.663	35.785	76.692	78.700	17.031	39.982	10.615
13	60.899	44.299	76.178	82.186	74.592	37.948	45.022	33.933	6.645
14	67.758	24.759	43.812	73.513	85.536	39.846	57.736	31.142	13.406
15	69.198	32.197	36.239	73.174	67.009	80.609	52.789	13.957	14.780
16	61.567	55.271	83.926	85.774	40.941	95.367	45.591	14.471	34.407
17	33.040	56.766	90.303	67.636	29.916	74.042	34.339	37.613	11.202
18	23.671	51.879	86.982	42.980	75.445	98.832	34.126	41.714	150.106
19	62.094	51.050	90.570	30.624	79.219	82.288	15.271	36.315	9.458
20	64.385	57.472	79.069	69.381	82.039	44.178	27.592	33.887	7.884
21	59.119	29.026	47.774	79.719	76.855	38.903	54.517	28.388	-573
22	56.552	26.986	49.293	45.178	76.490	87.822	49.757	14.404	36.473
23	62.334	62.715	82.493	69.105	35.819	115.228	108.732	13.103	24.611
24	28.323	66.588	89.992	71.137	37.498	73.602	38.091	30.872	19.438
25	26.816	65.998	100.158	32.572	73.453	79.277	18.129	30.671	15.688
26	61.963	65.169	84.245	28.636	80.486	64.134	18.999	31.024	8.668
27	63.520	61.602	85.948	72.140	67.467	33.704	41.411	27.345	14.423
28	61.811	34.027	44.326	79.726	49.768	27.804	48.013	24.699	15.395
29	59.826	-	38.927	69.389	79.670	64.903	42.283	13.210	17.756
30	58.462	-	84.494	68.333	43.520	43.836	40.904	10.466	27.527
31	27.756	-	90.638	-	30.434	-	37.582	24.589	-

Fonte: Worldometer (2021).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/12/2021, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Taisa Shimosakai de Lira, Usuário Externo**, em 08/12/2021, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Euclides Antônio Pereira de Lima, Usuário Externo**, em 08/12/2021, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3221457** e o código CRC **B6A99DEF**.
