



Ministério da Educação – Governo Federal  
Universidade Federal de Uberlândia  
Instituto de Ciências Agrárias  
Engenharia Ambiental



# **Estudo da concentração de ozônio troposférico na cidade de Uberlândia-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso

Leonardo Borges Rodrigues

Orientadora: Profa. Dra. Samara Carbone

Uberlândia, Dezembro de 2019

Leonardo Borges Rodrigues

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Estudo da concentração de ozônio na cidade de Uberlândia-MG

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Profª. Dra. Samara Carbone, na disciplina de  
Trabalho de conclusão de curso 2 do curso de  
Engenharia Ambiental, na Universidade  
Federal de Uberlândia.

Uberlândia - MG

Dezembro / 2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aqui ao meu professor, Dr. Euclides A. P. de Lima, que me deu a oportunidade de trabalhar e aprender sobre o tema da qualidade do ar com toda a sua experiência e por ter confiado a mim, trabalhar os dados desta pesquisa, agradeço também, a minha professora e orientadora, Dra. Samara Carbone, por me ensinar as bases teóricas e práticas nas matérias sobre poluição atmosférica e monitoramento do ar e, também, pela paciência e assistência na construção deste trabalho.

Em seguida meus agradecimentos vão para o Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães pelas dicas na parte estatística e para Luiza Homaied Lima e Marina Homaied Lima que fizeram a grande maioria das medidas em campo.

Agradecimentos especiais aos meus familiares, amigos e namorada pelo apoio e confiança de sempre e a todos que de qualquer forma fizeram parte da minha caminhada para a conclusão deste curso.

## RESUMO

Nos últimos anos houve uma grande mobilização da comunidade científica para o melhor entendimento dos processos físicos e químicos da atmosfera responsáveis pelo aquecimento global e degradação da qualidade do ar. Ambos possuem efeitos adversos à saúde humana e ao meio biótico. O gás ozônio ( $O_3$ ) troposférico é um exemplo de poluente responsável por tais impactos na baixa troposfera. O foco deste trabalho está no estudo das concentrações de ozônio ( $O_3$ ) que é um poluente secundário, ou seja, é formado a partir de reações fotoquímicas de poluentes precursores emitidos para atmosfera. Com o objetivo de avaliar a concentração deste poluente na cidade de Uberlândia, medidas foram feitas na área externa do terminal central de ônibus, no centro de Uberlândia - MG, durante o ano de 2017. Para a coleta dos dados de concentração de  $O_3$  foi utilizado o monitor de  $O_3$  portátil da série 200 da empresa Aeroqual Limited. Para a análise dos dados amostrados foi utilizada uma técnica de análise exploratória de dados: o box-plot. Com esse estudo ao longo do ano, pôde-se observar que os maiores valores médios de concentração foram obtidos nos meses entre setembro e novembro ( $53 - 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), um fato que pode se relacionar com o aumento da radiação solar nessa época do ano. E os menores valores médios foram identificados no período de maiores índices pluviométricos na cidade, em dezembro e janeiro ( $30 - 39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). A chuva remove os poluentes precursores à formação do  $O_3$  da atmosfera melhorando a qualidade do ar. A análise de dados indicou que não houve ultrapassagem do limite estabelecido pelo CONAMA 491/18 de  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de ar.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	4
1.1 Poluição atmosférica .....	4
1.2 Formação de $O_3$ troposférico.....	4
1.3 $O_3$ troposférico em ambientes urbanos .....	6
1.4 A cidade de Uberlândia.....	8
1.5 Legislação brasileira .....	9
2. Objetivos .....	9
3. Justificativa.....	9
4. Metodologia.....	10
4.1 Sítio de observações.....	10
4.2 Equipamentos e dados.....	11
4.3 Variáveis meteorológicas .....	12
4.4 Aplicação da análise exploratória dos dados medidos.....	13
4.5 Matriz de correlação de Pearson.....	14
5. Resultados e discussões .....	14
5.1 Variáveis meteorológicas .....	14
5.2 Dados de concentração no ano ao longo do ano de 2017 .....	16
5.3 Relações entre variáveis meteorológicas e concentração de ozônio .....	20
5.4 Perfil diário das concentrações de ozônio .....	24
5.5 Comparação do dados de concentração com dados de radiação solar nas amostragens de perfil diário.....	26
5.6 Distribuição horária das amostragens .....	27
6. Conclusão .....	28
7. Bibliografia.....	29
8. Apêndices .....	32
8.1 Apêndice a.....	32
8.2 Apêndice b.....	34
8.3 Apêndice c.....	34
8.4 Apêndice d.....	34
8.5 Apêndice e.....	35
8.6 Apêndice f.....	36
8.7 Apêndice g.....	36
9. Anexos .....	37
9.1 Anexo a .....	37

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A atividade humana tem sido responsável pela liberação de gases poluentes na atmosfera da Terra, especialmente em áreas urbanas e industriais (Seinfeld & Pandis, 2006). Muitos dos compostos liberados na atmosfera afetam tanto o meio ambiente como à saúde humana, alguns exemplos são: a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) provoca chuva ácida, os clorofluorcarbonetos (CFC) destroem a camada de ozônio, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) contribui para o aquecimento global e os compostos orgânicos voláteis (COV's), entre eles os hidrocarbonetos, possuem compostos carcinogênicos (Orlando, Alvim, Yamazaki, Corrêa, & Gatti, 2010).

A poluição atmosférica pode ser causada por fontes estacionárias ou móveis, dependendo dos processos que liberam os poluentes no ar. Durante muito tempo, as pessoas acreditavam que fontes móveis (veículos leves e pesados) produziram menos poluição do que as estacionárias. Esta crença foi provada errada em meados da década de 1980, quando estudos indicaram que os veículos eram a principal fonte de poluentes nas grandes cidades (Corrêa, 2003). Alguns exemplos de fontes fixas são as indústrias, as usinas termoelétricas que utilizam carvão, óleo combustível ou gás, bem como os incineradores de resíduos, com elevado potencial poluidor. Já para as fontes móveis de poluentes atmosféricos têm-se como principais exemplos os veículos automotores, juntamente com os trens, aviões e embarcações marítimas (Pires, 2005).

Outro poluente comumente encontrado em atmosferas urbanas é o ozônio troposférico (O<sub>3</sub>), que pode ser prejudicial à saúde humana e também é um gás de efeito estufa (Reid, Yap, & Bloxam, 2008). Apesar do O<sub>3</sub> afetar a saúde de toda a população, é mais prejudicial para crianças, idosos, e pessoas com condições cardiorrespiratórias mais sensíveis (Orlando et al., 2010).

O O<sub>3</sub> também destrói culturas agrícolas (Felzer, Cronin, Reilly, Melillo, & Wang, 2007), devido à sua capacidade de atacar cloroplastos vegetais, que são responsáveis pela respiração das plantas. Ozônio reage com gás etileno emitidos pelas plantas, gerando radicais livres que causam danos aos tecidos das plantas e conseqüentemente diminuindo a fotossíntese (Orlando et al., 2010).

## 1.2 FORMAÇÃO DE O<sub>3</sub> TROPOSFÉRICO

O O<sub>3</sub> troposférico é um poluente secundário e sua formação é um processo complexo e não linear dependente dos parâmetros meteorológicos (intensa radiação solar, altas temperaturas, baixa umidade relativa, ventos fracos) e existência dos gases precursores (COV's e NO<sub>x</sub>) (Seinfeld & Pandis, 2006).

Como não há fontes naturais diretas do gás ozônio, diz-se que ele é uma substância atmosférica secundária, ou seja, ele é formado a partir da fotodecomposição do NO<sub>2</sub>, que formará o oxigênio atômico O (<sup>3</sup>P), reação 1, o qual ao reagir com o oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) leva a formação do O<sub>3</sub> troposférico, reação 2. Essa reação de formação e dissociação de ozônio se mantém estável pois, o NO reage consumindo o O<sub>3</sub> que se forma em (2) e recompõe o NO<sub>2</sub> que será consumido em (1) (Seinfeld & Pandis, 2006).



Onde M serve para atenuar a energia excedida nas reações e é chamado de terceiro corpo e é predominantemente N<sub>2</sub> e o hν é a radiação solar de comprimento de onda λ < 420 nm.

O acúmulo de O<sub>3</sub> na atmosfera ocorre quando há vias adicionais e paralelas de formação de NO<sub>2</sub>, como é o caso da formação de NO<sub>2</sub> via radicais hidroperoxila (HO<sub>2</sub><sup>\*</sup>) e peróxi orgânicos (RO<sub>2</sub><sup>\*</sup>), reação (4):



Onde R representa uma cadeia carbônica. Esses compostos peróxidos são formados na atmosfera como produto da reação entre os COV's e outros oxidantes, tais como radical hidroxila (OH<sup>\*</sup>). A formação e o acúmulo do O<sub>3</sub> dependem então da presença de radicais peróxi na atmosfera que geram NO<sub>2</sub>, o qual na presença de radiação solar formará mais O<sub>3</sub> (Reação 3) (Seinfeld & Pandis, 2006).

Os COV's são amplamente liberados pela flora e pelos processos envolvendo os combustíveis fósseis. Os COV's têm papel importante no equilíbrio das reações (1,3), que envolvem a formação do O<sub>3</sub>, pois o alteram e contribui para a formação de NO<sub>2</sub> nas grandes cidades como resultado da grande atividade antrópica (Atkinson & Arey, 2003).

São considerados COV's todos os compostos orgânicos com ponto de ebulição relativamente baixo (50 – 260 °C), ou seja, evaporam facilmente dos materiais que os contém (Jacobson, 2002). Em detrimento do alto número de diferentes compostos orgânicos presentes na atmosfera, é apropriado agrupá-las em classes de compostos, chamadas funções orgânicas, baseadas em sua estrutura molecular, com cada classe comportando-se de forma parecida na atmosfera (Finlayson & Pitts, 2000).

A dependência da produção de O<sub>3</sub> nas quantidades iniciais de COV e NO<sub>x</sub> é frequentemente representada por meio de um diagrama de isopletas de ozônio (Figura 1). Esse diagrama apresenta linhas de contorno de concentrações máximas de O<sub>3</sub> obtidas em função das concentrações iniciais de COV e NO<sub>x</sub> (Seinfeld & Pandis, 2006).

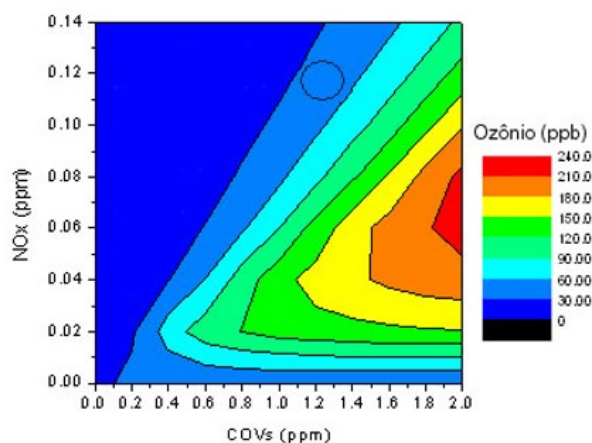


Figura 1 - Diagrama de isopletas de ozônio. Fonte: (Orlando et al., 2010)

Atenção especial tem sido dada aos COV's provenientes da combustão do etanol e do biodiesel, já que o seu uso tem aumentado nesta última década no Brasil devido a políticas de incentivo do uso de combustíveis alternativos ao petróleo. Quando comparado a outros combustíveis, o etanol e o biodiesel produzem menos CO, porém mais aldeídos tais como formaldeído e acetaldeído, os quais são importantes para a formação de O<sub>3</sub> (Corrêa, 2003).

### 1.3 O<sub>3</sub> TROPOSFÉRICO EM AMBIENTES URBANOS

Entre os principais aspectos relacionados aos ambientes urbanos está o uso intensivo de transporte automotivo, sobretudo o de uso individual. O crescente uso de transporte automotivo tem sido um fator central, pois traz consigo o aumento das emissões de gases



de efeito estufa (Stathopoulou, *et al*, 2008). Esta seção traz alguns resultados de pesquisas com medidas de ozônio troposférico em algumas cidades do país e fora.

Na região metropolitana de São Paulo a alta variabilidade temporal do ozônio troposférico encontrada indica que os limites são potencialmente excedidos em diversos momentos ao longo do ano na estação Ibirapuera, como ocorreu em 2014, quando houve 43 ultrapassagens do PQAr estadual que é de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ou cerca de 60 ppb na RMSP (CETESB, 2015). De acordo com Andrade (2012), durante um experimento na RMSP, as concentrações de ozônio encontradas na troposfera foram aproximadamente 40 ppb ( $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), atingindo valores máximos de aproximadamente 60 ppb ( $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante o período da estação seca e por volta de 100 ppb ( $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante o período da estação chuvosa. Também houve diferenças nas concentrações de ozônio, mais baixos à noite e maiores à tarde. As concentrações máximas ocorreram em 31 de outubro (primavera) às 14:19 e 17:44 UTC (Andrade *et al.*, 2012).

De acordo com Dutra *et al* (2009), a rede de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) verificou que em 2008, a estação Praça Rui Barbosa, em Belo Horizonte, registrou 49 dias com concentrações de ozônio maiores que  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , já na estação Bairro Petrovale, em Betim, que sofre influência da emissão de poluentes precursores de ozônio, não só de origem veicular como também de origem industrial, apresentou 10 dias com ultrapassagens do Padrão de Qualidade do Ar (PQAr) vigente na época de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , o que classifica a qualidade do ar como inadequada. Já em 2009, na região de Petrovale, o limite máximo de concentração de ozônio foi ultrapassado em alguns dias e os valores mais altos ocorreram em maio ( $274,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), em março ( $273,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e em fevereiro ( $260,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Dutra, *et al*, 2009).

Em Curitiba, medidas de  $\text{O}_3$  foram feitas no período entre setembro e outubro de 2011 e a média da concentração horária máxima de ozônio troposférico na Estação Ouvidor Pardiniho foi de  $69,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Foram feitas medidas em locais diferentes, e a média dos valores obtidos, de acordo com Polli (2011), no Local 1 foi de  $127,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , no Local 2 de  $123,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e no Local 3 de  $156,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No Local 3 a medida de  $402,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , detectada no dia 17 de outubro de 2011 ultrapassou o Nível de Atenção, estabelecido em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pela legislação (Polli, 2011).

De acordo com Stathopoulou (2008), a região da grande Atenas, que inclui cerca de 40% da população grega, cerca de 50% dos automóveis e 50% das atividades industriais gregas combinado com o grande número de dias ensolarados (verão europeu), apresentou medidas de concentração de ozônio que flutuam entre 4 e 297 ppb (aproximadamente 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e 583  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Dentre estes valores, cerca de 11,6% estão acima de 120 ppb, o valor usado para referência da PQAr dos EUA (Stathopoulou, *et al.*, 2008).

#### 1.4 A CIDADE DE UBERLÂNDIA

Uberlândia é um município brasileiro do interior do estado de Minas Gerais, Região Sudeste do país. Localiza-se a oeste da capital do estado, Belo Horizonte, distanciando-se cerca de 537 quilômetros. Sua população, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), era de 683 247 habitantes em 2018, sendo o município mais populoso da região do Triângulo Mineiro e o segundo mais populoso de Minas Gerais.

Em relação à frota automobilística, em 2018 foram contabilizados 460.470 veículos (IBGE). É também a principal e maior cidade do Triângulo Mineiro. Conta ainda com localização geográfica privilegiada, já que, com a sua malha rodoviária, está ligada aos grandes centros nacionais, como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Goiânia e Brasília.

Uberlândia tem a altitude média de 887m. Possui relevo típico de chapada (suavemente ondulado sobre formações sedimentares, apresentando vales espaçados e raros) (Carrijo & Baccaro, 2000).

Está localizada junto à bacia do rio Paranaíba, tendo em seu território várias sub-bacias. A bacia do Araguari, por exemplo, abrange a porção leste do município e seu principal afluente, na área do município, é o rio Uberabinha, que passa dentro do perímetro urbano.

O clima é caracterizado como tropical ou Cwa pela nomenclatura de Koppen, com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média compensada anual em torno de 22 °C. Outono e primavera são estações de transição. O índice pluviométrico é pouco superior a 1600 milímetros (mm), concentrando-se nos meses de verão.

A vegetação predominante do município é o cerrado e suas variáveis como veredas, campos limpos, campos sujos ou cerradinhos, cerradões, matas de várzea, matas de galeria ou ciliares e matas mesofíticas.

### 1.5 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Com a finalidade de limitar e reduzir as emissões atmosféricas prejudiciais à saúde humana, animal, vegetal e meio ambiente no Brasil, o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabeleceu padrões de qualidade do ar. Os padrões de qualidade do ar serão o objetivo a ser atingido mediante à estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão e deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar (CONAMA 491/18). O padrão primário de O<sub>3</sub>, de acordo com a resolução CONAMA 491/18 é: concentração de 140 (cento e quarenta) microgramas por metro cúbico do ar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) em um período de 8 horas de máxima média móvel obtida no dia.

## 2. OBJETIVOS

Sendo assim, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo estudar e analisar os dados coletados de concentração de O<sub>3</sub> no ano de 2017 na cidade de Uberlândia-MG.

Objetivos específicos

- ✓ Avaliar se há variabilidade diurna na concentração de O<sub>3</sub> em diferentes horários de amostragem, identificando assim a faixa horária com maiores concentrações diárias.
- ✓ Avaliar se as concentrações de ozônio apresentam algum padrão em relação às variáveis meteorológicas.

## 3. JUSTIFICATIVA

A cidade de Uberlândia é a segunda maior cidade do estado de Minas Gerais (IBGE) e uma das maiores do país com um polo logístico de intensa movimentação de veículos de todos os tipos, além de possuir um grande parque industrial. Fica situada numa região de cerrado, onde há período seco (maio-setembro) e período chuvoso (outubro-abril), no período seco os poluentes atmosféricos ficam em grandes concentrações na troposfera o que favorece a formação de poluentes secundários, tais como o O<sub>3</sub> troposférico. Assim, a proposta deste projeto é pioneira, visto que não há estações de monitoramento da

qualidade do ar mantidas por órgãos municipais de saúde ou meio ambiente e não havia conhecimento das concentrações de O<sub>3</sub> troposférico na cidade antes de 2017.

#### 4. METODOLOGIA

##### 4.1 SÍTIO DE OBSERVAÇÕES

As medidas foram feitas na área externa do terminal central de ônibus coletivo (Figura 2), nas proximidades da interseção entre as avenidas João Pinheiro e João Naves de Ávila, no centro de Uberlândia - MG, no ano de 2017. Local escolhido pelo fato de já ocorrer em paralelo medidas de material particulado de 10 e 2,5 µm e partículas totais em suspensão (MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> e PTS, respectivamente) então, há uma estrutura adequada para este tipo de medida (Figura 3).

No local, amostragens dos poluentes primários citados acima já são feitas desde o ano de 2003, uma parceria feita entre a prefeitura e a faculdade de engenharia química (UFU). Este local foi escolhido para que os equipamentos ficassem em local seguro e central da cidade.

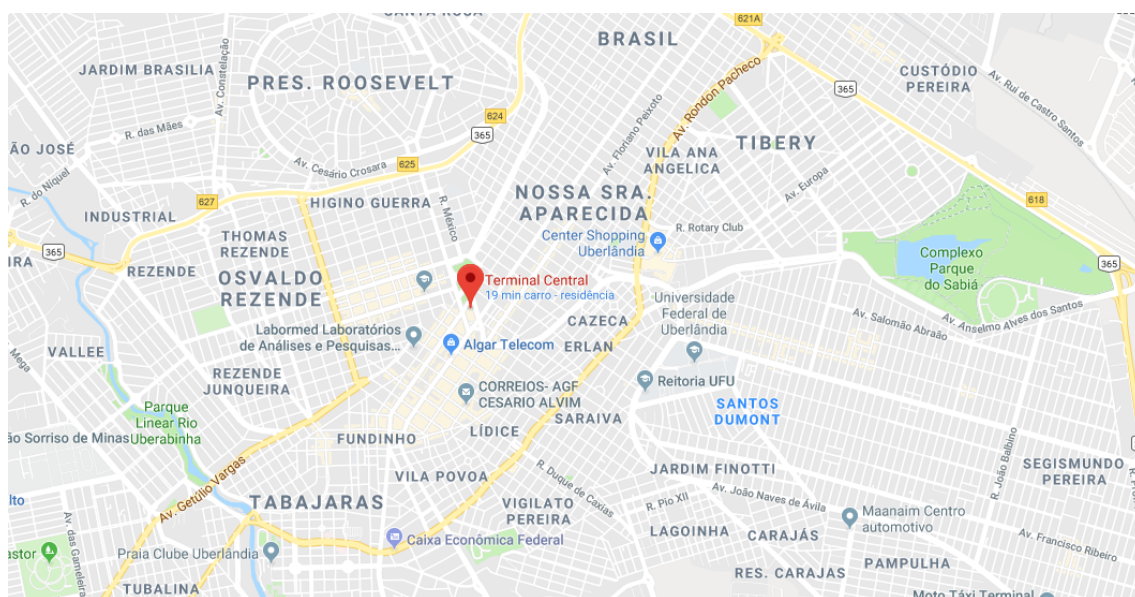


Figura 2 - Mapa com a localização do local de medida, Terminal Central. Fonte: google.maps



Figura 3 – Local de medidas e equipamento Aeroqual montado para medição. Fonte: próprio autor.

#### 4.2 EQUIPAMENTOS E DADOS

Para as medidas de concentração de  $O_3$  foi utilizado o monitor de  $O_3$  portátil da série 200 da empresa Aeroqual Limited, Figura 4. Esse é um monitor de baixo custo compatível com 4 gamas de sensores de ozônio (Sensor  $O_3$  0 – 0.05ppm, sensor  $O_3$  0 – 0.15ppm, sensor  $O_3$  0 – 0.5ppm, sensor  $O_3$  0 – 10ppm), o sensor usado neste estudo foi o de faixa 0 – 0,05ppm. Trata-se de um dispositivo de nível básico projetado para verificar a concentração de  $O_3$  em uma variedade de aplicações. O display pode ser configurado para mostrar a concentração de  $O_3$  em tempo real ou exibir as leituras mínima, máxima e média. As concentrações podem ser exibidas em ppm ou  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , conversão feita pelo próprio sistema do aparelho (Manual Aeroqual 200 Series).

Durante as medidas o monitor fica em um tripé 1,5 m (um metro e meio) acima do solo do local. As concentrações são fornecidas pelo equipamento a cada minuto, resultando em 60 (sessenta) dados em 1 hora de amostragem. Os dados são anotados, manualmente, em uma planilha. A amostragem foi feita em sua maioria das vezes no período entre 12:00 (meio-dia) e 15:00 da tarde, por ser o período de maior incidência de radiação solar. As

medidas foram a cada três dias no período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2017, incluindo finais de semana e feriados.

Também foram realizadas medidas a cada 30 minutos de intervalo das 09 às 18h em três dias para estudar o perfil de formação do O<sub>3</sub> ao longo do dia. Estas medidas do perfil diurno no terminal central foram realizadas no mês de julho de 2018 nos dias 18, 19 e 20.



Figura 4 - Amostrador de O<sub>3</sub> Aeroqual 200.

Ao longo do ano de 2017 foram realizadas seis mil setecentos e vinte (6.720) medidas em cento e dezoito (118) dias utilizando o mesmo equipamento, feitas no mesmo local, variando apenas a faixa horária. Esses dados inicialmente foram registrados em planilhas de papel no próprio local, durante a coleta. Com este trabalho, foram registrados 112 dados de média horária e também foram registrados os valores máximos de cada amostragem. Todos esses dados foram transcritos para planilhas eletrônicas, utilizando o software Microsoft Office Excel, para análise.

#### 4.3 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Para as variáveis meteorológicas, foram usados dados fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), da estação meteorológica A507 de Uberlândia, registrados às 15 UTC (Coordinated Universal Time) ou 12 horas no horário local. Foram utilizados neste estudo as seguintes variáveis:

- Temperatura;
- Umidade relativa do ar;
- Radiação solar;
- Pressão atmosférica;



- Precipitação;
- Velocidade do vento.

No tópico 5.3 os dados dos parâmetros meteorológicos que foram correlacionados com os dados de concentração de O<sub>3</sub> correspondem as médias mensais dos dados medidos todos os dias às 12 horas no horário local.

#### 4.4 APLICAÇÃO DA ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS MEDIDOS

Para a análise das medidas foi utilizada uma técnica de análise exploratória de dados: o box-plot. Essa análise é uma representação gráfica de valores, conhecidos como resumo de 5 números. Essa técnica revela uma boa parte da estrutura dos dados, por meio da visualização de características como:

- Tendência central;
- Variabilidade;
- Assimetria;
- Outsiders (valores discrepantes).

O chamado resumo de cinco números será constituído pelo: mínimo (menor valor), primeiro quartil (Q1), a mediana (Md), o terceiro quartil (Q3) e o máximo (maior valor), Figura 5.

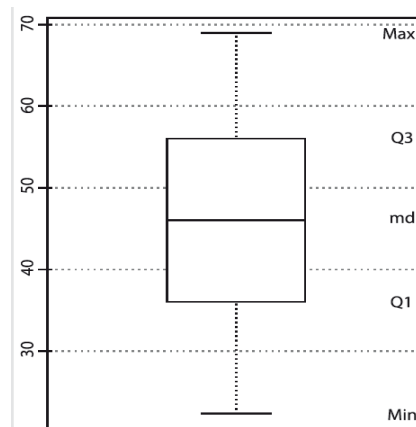


Figura 5 - Exemplo de diagrama de caixa, método que será utilizado para análise.

A parte central do gráfico é composta de uma “caixa” com o nível superior dado por Q3 e o nível inferior por Q1. O tamanho da caixa é uma medida de dispersão chamada amplitude interquartílica ( $AIQ = Q3 - Q1$ ). A mediana, medida de tendência central, é

representada por um traço no interior da caixa e segmentos de reta são colocados da caixa até os valores máximo e mínimo (Guimarães, 2008).

#### 4.5 MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Para verificar a significância ( $\alpha$ ) da correlação das variáveis meteorológicas com a concentração de ozônio, foi usada a matriz de correlação de Pearson e a matriz de valor- $\rho$  ou probabilidade de significância. Este coeficiente de correlação expressa o grau de dependência linear entre duas variáveis.

O coeficiente de correlação tem valores entre  $-1$  e  $+1$ , sendo negativo quando uma variável diminui com o aumento da outra variável, e positiva quando uma variável aumenta com o aumento da outra.

Nesta etapa também temos o valor- $\rho$  (também chamado de probabilidade de significância), é a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em uma amostra, sob a hipótese nula. Isto significa que, para um nível de confiança  $\alpha=95\%$ , os valores são significantes quando o valor de  $\rho$  é menor do que  $0,05$ .

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

A seguir, a Figura 6 mostra as variáveis meteorológicas, para o ano de 2017 (Janeiro – Dezembro).



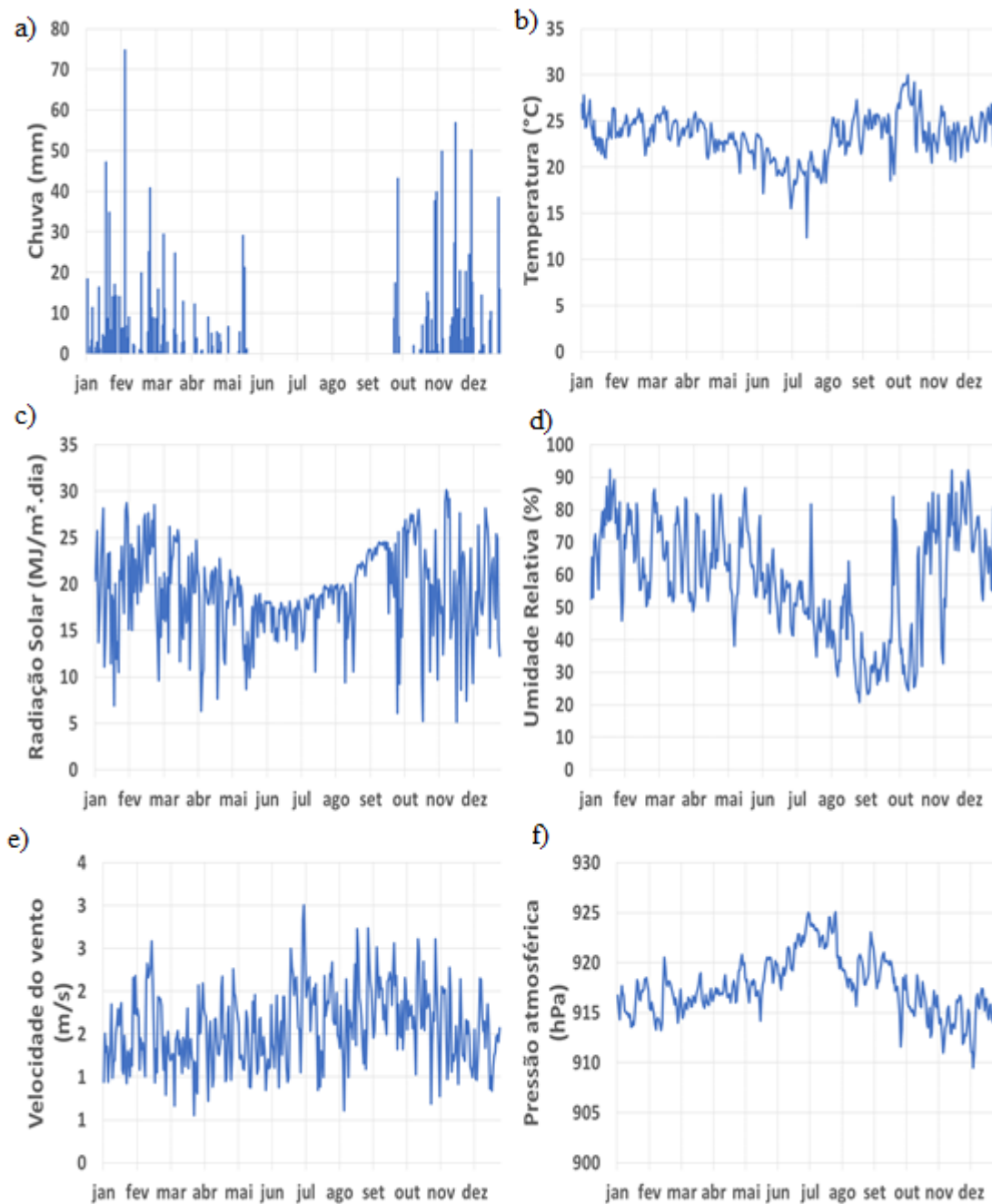


Figura 6 – Perfil anual das variáveis meteorológicas para 2017 em Uberlândia, com registros às 12hrs em horário local. Fonte: INMET

De acordo com Figura 6, a temperatura do ar de Uberlândia ao longo do ano de 2017 variou entre 12,4 °C e 30,0 °C. As maiores temperaturas foram observadas nos meses de outubro e janeiro e as menores nos meses de junho e julho. Para a radiação solar, os valores variaram de 5,14 a 30,15 MJ/m<sup>2</sup>.dia durante o ano com os maiores valores foram registrados em outubro e novembro. A precipitação variou de 0 a 74,8 mm acumulados

até o momento de registro da medida, sendo os menores valores em junho, julho e agosto e os maiores em fevereiro e dezembro. A umidade relativa do ar ficou entre 20,8 e 92,3 % ao longo do ano com máxima em janeiro e mínima em agosto. A velocidade do vento variou entre 0,56 m/s em março e 3,0 m/s em julho. Por fim, a pressão atmosférica variou de 909,49 hPa a 925,10 hPa nos meses de dezembro e julho, respectivamente.

A fim de comparar esses valores obtidos com as médias climatológicas do INMET, a Tabela 1 abaixo mostra que o ano de 2017 teve algumas variações atípicas para algumas variáveis meteorológicas. Por exemplo, as maiores temperaturas são obtidas em outubro e fevereiro, a maior umidade relativa do ar em dezembro, a maior intensidade do vento em agosto, menor pressão atmosférica em novembro e maiores precipitações em dezembro, janeiro e março. A média climatológica para o parâmetro radiação solar não estava disponível assim como a pressão e a intensidade do vento que não tinham dados medidos em Uberlândia e, portanto, foi usado dados da cidade mais próxima de porte semelhante, Uberaba.

Podemos concluir que das pequenas diferenças observadas, as variáveis meteorológicas estavam muito próximas às médias climatológicas.

Normal Climatológica do Brasil 1981-2010														
Parâmetro	Estação	UF	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	UBERLANDIA	MG	23,60	23,70	23,40	22,80	20,60	19,30	19,20	21,20	23,20	23,80	23,50	23,20
Pressão (hPa)	UBERABA	MG	926,7	927,4	927,8	929,1	930,6	931,8	932,5	931,6	929,9	928,2	926,4	926,8
Umidade Relativa do ar (%)	UBERLANDIA	MG	78,8	77,2	78,9	73,9	70,9	68,1	61,9	56,3	58,7	66,9	74,0	79,5
Precipitação Acumulada (mm)	UBERLANDIA	MG	299,0	201,8	225,5	83,1	33,9	19,2	7,8	15,3	46,4	116,3	215,1	342,7
Intensidade do vento (m/s)	UBERABA	MG	2,5	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,9	3,4	3,3	3,2	2,9	2,8

Tabela 1 – Tabela das normais climatológicas do Brasil 1981-2010. Fonte: INMET

## 5.2 DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE O<sub>3</sub> AO LONGO DO ANO DE 2017

Para facilitar a visualização e análise, os dados estão agrupados na Figura 7 com as médias horárias, medidas feitas entre 10 e 16 horas em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , bem como o padrão primário de O<sub>3</sub> estabelecido pelo CONAMA ( $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e a linha de tendência com aproximação polinomial de sexto grau para representar as concentrações médias horárias ao longo do

ano. Os valores numéricos utilizados na Figura 7 estão apresentados no apêndice A deste trabalho.

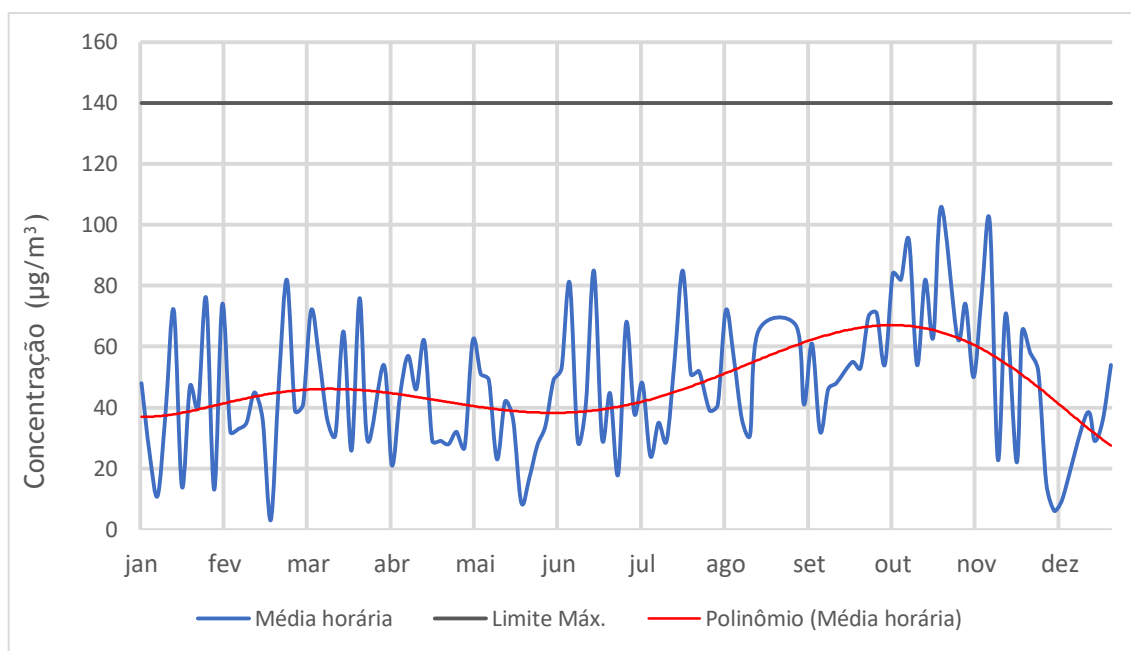


Figura 7 – Médias horárias (intervalo de 10 às 16 horas) de O<sub>3</sub> ao longo de 2017.

Durante o ano de 2017 observa-se uma variação na média de concentrações de 3 µg/m<sup>3</sup> em fevereiro e 106 µg/m<sup>3</sup> em outubro. Períodos chuvosos foram os que se obtiveram as menores concentrações, como em dezembro (6 – 54 µg/m<sup>3</sup>), janeiro (11 – 72 µg/m<sup>3</sup>) e fevereiro (3 – 82 µg/m<sup>3</sup>), já os meses de primavera foram os que registraram maiores concentrações, principalmente outubro (54 – 106 µg/m<sup>3</sup>) e novembro (22 – 101 µg/m<sup>3</sup>). Os valores pontuais máximos, que correspondem aos maiores valores medidos pelo equipamento no intervalo de uma hora, foram obtidos também nos meses de outubro (duas medidas de 143 µg/m<sup>3</sup> e uma de 156 µg/m<sup>3</sup>) e novembro (uma medida de 141 µg/m<sup>3</sup>), não mostrados neste estudo.

Em outubro foi registrada a maior mediana do ano na estação (82 µg/m<sup>3</sup>), sendo que os dias de maiores medidas foram os dias 09, 12, 15, 21 e 27. Na Tabela 2 a seguir serão comparados três dias (09, 12 e 21) de medidas da estação do Terminal Central de Uberlândia com três estações da CETESB-SP (2017) no estado de São Paulo, nos mesmos horários de medida:

Cidade	Estação	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
		09/10/2017	12/10/2017	21/10/2017
		12:00/13:00	15:00/16:00	12:30/13:30
Uberlândia	Terminal Central	84	82	82
São Paulo	Parque Ibirapuera	89	145	80
São Paulo	Pinheiros	64	112	61
Cubatão	Centro	45	83	18

Tabela 2 – Comparação entre as estações de monitoramento de  $\text{O}_3$ . Fonte: (CETESB, 2017)

Podemos perceber valores mais altos na estação do Parque Ibirapuera, região arborizada e com concentrações altas de  $\text{O}_3$  na primavera e menores valores nas Estações de Pinheiros e Cubatão pois estão em áreas centrais, que sofrem influência mais direta de emissão de poluentes primários. Nestas regiões a razão  $\text{COV}/\text{NO}_x$  não é ideal para formação de  $\text{O}_3$ , por isso, estes valores são menores (CETESB, 2012). Vale ressaltar que não foram levados em consideração as condições meteorológicas desses dias nessas estações de monitoramento. Portanto, é possível que as diferentes estações estivessem susceptíveis a variabilidades de nebulosidade e/ou precipitação.

Como descrito na parte metodológica deste trabalho, foi aplicada uma análise exploratória de dados chamada diagrama de caixas ou box-plot. Essa análise tem como objetivo verificar a tendência central, a variabilidade, a assimetria e os *outliers* (valores discrepantes) das médias horárias de todas as amostragens ao longo do ano de 2017.

Para essa etapa foi utilizado o software Microsoft Excel e suas próprias fórmulas matemáticas para construção das tabelas de valores e plotagem dos gráficos com os diagramas de caixas de cada mês, Figura 8, (Apêndice B).

Vale ressaltar que nos meses de janeiro, março, abril, maio, junho, julho e novembro têm-se 10 dados em cada box, em fevereiro, setembro e outubro 9 dados, dezembro 8 dados e agosto 7 dados no box.

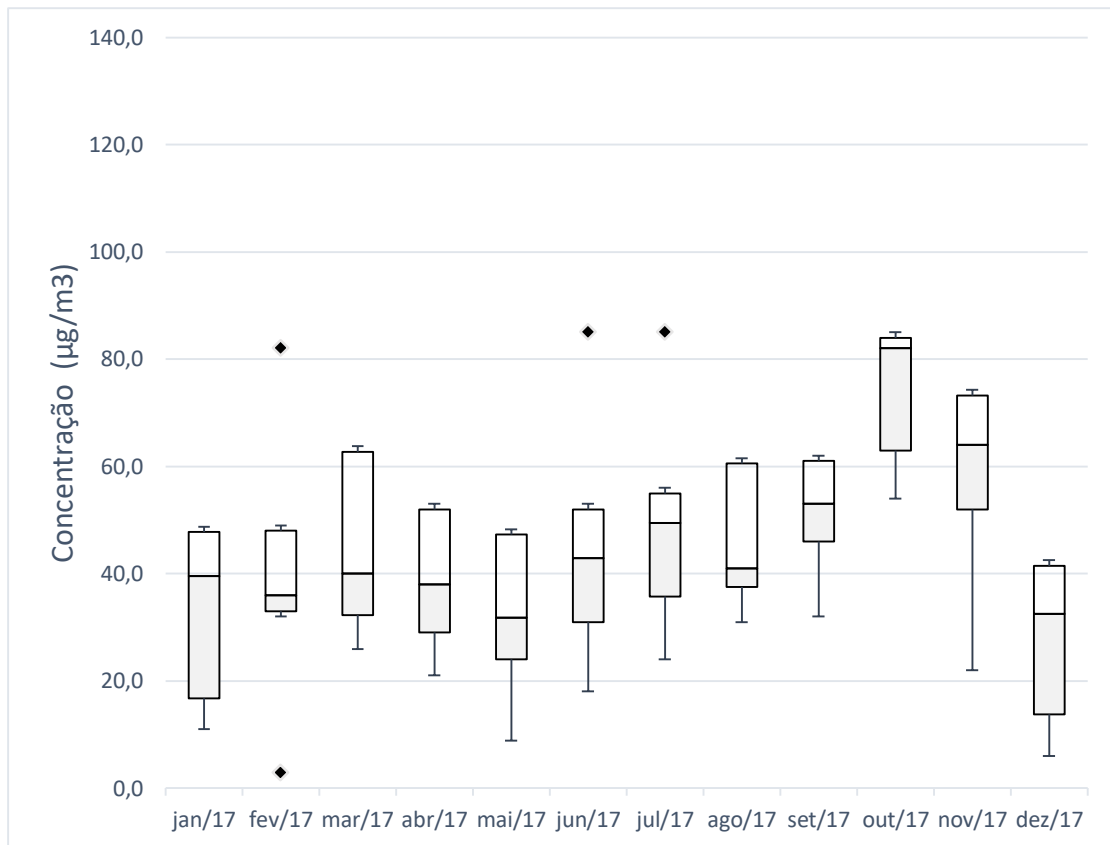


Figura 8 – Box-plot das concentrações de O<sub>3</sub> ao longo do ano de 2017.

De acordo com a Figura 8, pode-se ver que a mediana dos dados segue a tendência da curva da Figura 7, que resume as médias horárias das concentrações ao longo do ano.

Outro ponto importante é a variabilidade dos pontos, esse resultado mostra a variação ou o “range” de concentração que os resultados alcançaram em cada mês, do menor ao maior valor. A pouca simetria entre as partes inferiores e superiores dos blocos significa que a há maior dispersão nos conjuntos de dados de cada box. Foram obtidos quatro pontos *outliers*, ou seja, pontos que ficaram de fora das caixas por estarem acima do limite superior ou abaixo do limite inferior calculados através da equação (1) e (2) para cada mês, são considerados pontos discrepantes, que ficaram muito acima ou abaixo da média dos outros resultados.

$$Ls = (Qs + 1,5x(Qs-Qi)) \quad (1)$$

$$Li = (Qi - 1,5x(Qs-Qi)) \quad (2)$$

Onde, Qs é o quartil superior e Qi quartil inferior.

Nota-se valores baixos de medianas nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e dezembro ( $39,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $36,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $40,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $38,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $31,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $32,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente) que é considerado o período chuvoso na região. Durante os meses de junho, julho e agosto a mediana fica entre 40 e  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e já a partir de setembro, a mediana atinge concentrações de  $\text{O}_3$  mais altas, de  $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em setembro,  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em outubro e  $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em novembro. Este pico em outubro pode estar relacionado com a baixa precipitação e com uma leve alta na irradiação solar na região.

### 5.3 RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO

Nesta seção, as médias das concentrações mensais de  $\text{O}_3$  foram relacionadas às variáveis meteorológicas para identificar se existe relação e significância entre as mesmas. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), a relação entre  $\text{O}_3$  e radiação, por exemplo, é significativa e, portanto, nesse caso a concentração de  $\text{O}_3$  poderia aumentar com o aumento da radiação e o inverso aconteceria com a precipitação, por exemplo (EPA, 2005).

Utilizando os dados meteorológicos da estação do INMET A507 e código OMM: 86776 em Uberlândia/MG (Anexo A), foram calculadas as médias mensais (Apêndice C) dos seis principais parâmetros meteorológicos (temperatura, radiação solar, chuva, pressão atmosférica, velocidade do vento e umidade relativa) e relacionados às médias mensais de  $\text{O}_3$ , Figura 9.

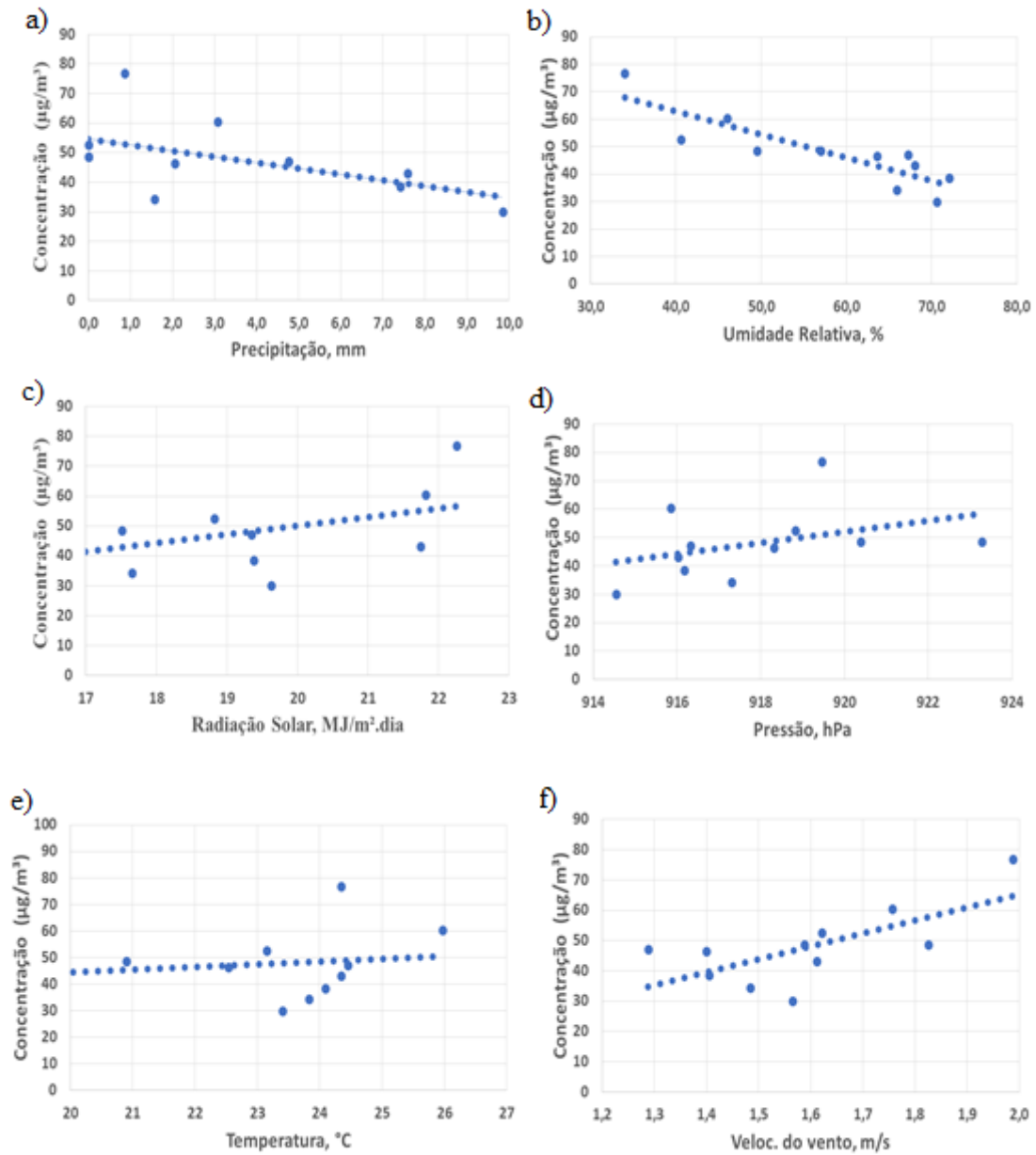


Figura 9 –Médias mensais das variáveis meteorológicas e das concentrações médias de O<sub>3</sub>.

Para analisar as relações entre as variáveis foi utilizado o método da Matriz de Correlação de Pearson e valor- $\rho$ , juntamente com o coeficiente de determinação  $R^2$ . Os resultados são mostrados a seguir, na Tabela 3.

	Coef. Correlação Pearson, R	$\rho$ -valor	$R^2$
Chuva	-0,085	0,792	0,0073
Temperatura	0,260	0,414	0,0676
Radiação	0,524	0,080	0,2744
Umidade Relativa	-0,494	0,103	0,2439
Pressão atmosférica	-0,030	0,925	0,0009
Velocidade do vento	0,549	0,064	0,3016

Tabela 3 – Estatísticas dos dados mensais entre concentrações de O<sub>3</sub> e variáveis meteorológicas.

Observa-se que os valores de  $\rho$  encontrados são todos bastante elevados. Para um nível de significância de 95%, valores de  $\rho$  que forem menores que 0,05 indicam que há significância e para valores maiores que 0,05 que não há significância. Portanto, de acordo com os resultados obtidos para o valor  $\rho$ , não houve significância entre a concentração de O<sub>3</sub> em nenhuma das variáveis meteorológicas testadas, pois estão todas acima de 0,05. Os valores para o coeficiente de determinação  $R^2$  também se mostraram bastante baixos, indicando uma fraca correlação linear entre as variáveis. O coeficiente de correlação para os parâmetros chuva, umidade relativa e pressão foi negativo, o que significa que o aumento da chuva e da umidade relativa levam a uma diminuição da concentração de O<sub>3</sub>. Enquanto que os parâmetros radiação, temperatura e velocidade do vento apresentaram um coeficiente de correlação positivo, indicando que o aumento destas variáveis meteorológicas leva ao aumento da concentração do O<sub>3</sub>.

A seguir, a Figura 10 relaciona a concentração de O<sub>3</sub> somente com a radiação solar, que pela literatura é a variável que mais influencia a formação de O<sub>3</sub>. No entanto, nesta análise foram usadas as médias para cada dia de amostragem do ano, ao invés das médias mensais (dados disponíveis no Apêndice D). Os resultados estatísticos se encontram na Tabela 4. Observa-se que o valor  $\rho$  se aproximou mais de 0,05 em relação ao resultado da Tabela 3, no entanto ainda resultou na não significância entre as variáveis e manteve um valor de  $R^2$  muito baixo (0,0306). Este resultado indica que a correlação entre as variáveis é baixa.



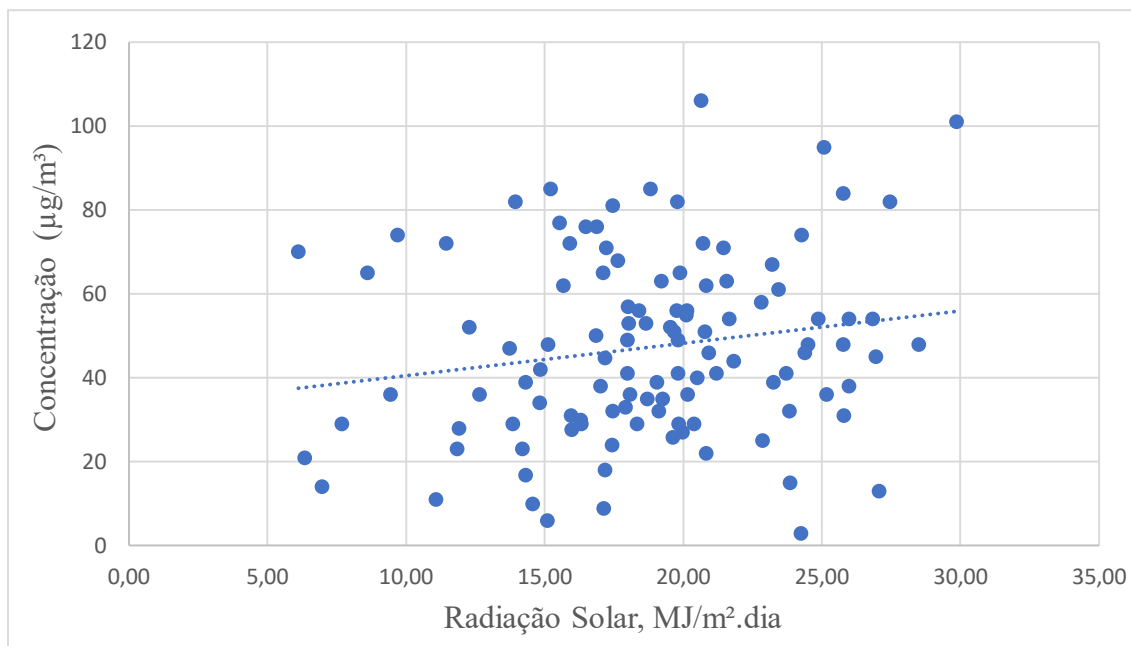


Figura 10 – Gráfico Radiação Solar X concentração de O<sub>3</sub>, dia/dia

	Coef. Correlação Pearson	ρ-valor	R <sup>2</sup>
Radiação	0,175027143	0,06492	0,0306

Tabela 4 - Estatísticas para os dados dia a dia

É importante ressaltar que as comparações entre variáveis meteorológicas e concentrações de O<sub>3</sub> realizadas neste estudo podem conter incertezas, uma vez que o tempo integrado para comparação era diferente. Isto é, enquanto que os dados de O<sub>3</sub> correspondem à valores médios de uma hora de amostragem a cada três dias por mês, os dados dos parâmetros meteorológicos correspondem a dados pontuais feitos às 15 UTC. Portanto, é possível que os dados medidos de O<sub>3</sub> e de parâmetros meteorológicos, não sejam exatamente comparáveis. Este pode ser um dos motivos porque as correlações, principalmente envolvendo a radiação solar tenha apresentado valores baixos de R<sup>2</sup>.

Outra fonte de incerteza que deve ser considerada é com relação à localização da estação, que sofre grande influência direta da emissão de poluentes primários, podendo levar à razões de COV/NO<sub>x</sub> que não sejam favoráveis à formação de O<sub>3</sub>.

Percebeu-se também, que o aparelho demora em torno de dez minutos (10 primeiros pontos medidos) em cada medição para aquecer o sensor, e alguns dos valores medidos neste período de tempo podem conter incertezas, já que costumam ser menores do que os

demais, como mostra a Figura 11. Isto pode ter levado uma subestimação das médias de concentração horárias.

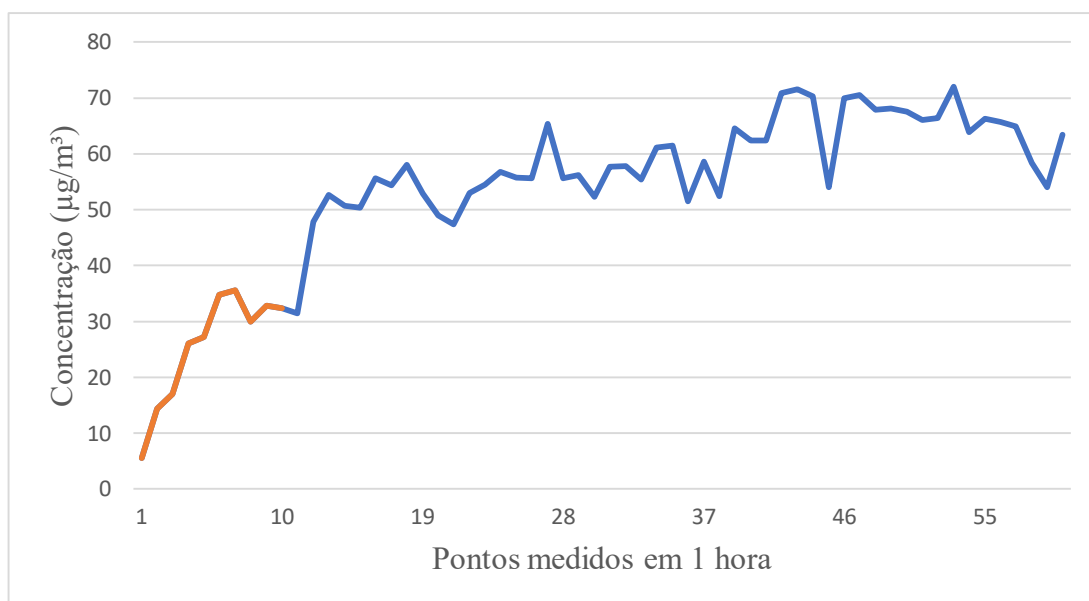


Figura 11 – Gráfico dos pontos medidos em 1 hora de medição

A Figura 11 apresenta uma média de 12 medidas horárias feitas minuto a minuto durante uma hora. Foi utilizado o primeiro dia de cada mês do ano para a realização das médias.

#### 5.4 PERFIL DIÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO

Como não existe nenhum outro estudo sobre as concentrações de ozônio na cidade de Uberlândia, é muito importante que se faça uma amostragem ao longo do dia para que se possa ter dados do perfil diário das concentrações de gás.

Para o perfil diário foi seguido o roteiro de medidas descrito na metodologia do presente trabalho. Sendo assim, observa-se na Figura 12 o perfil diário dos três dias de amostragem e o perfil da média desses dias. Os dados utilizados podem ser encontrados no Apêndice E.

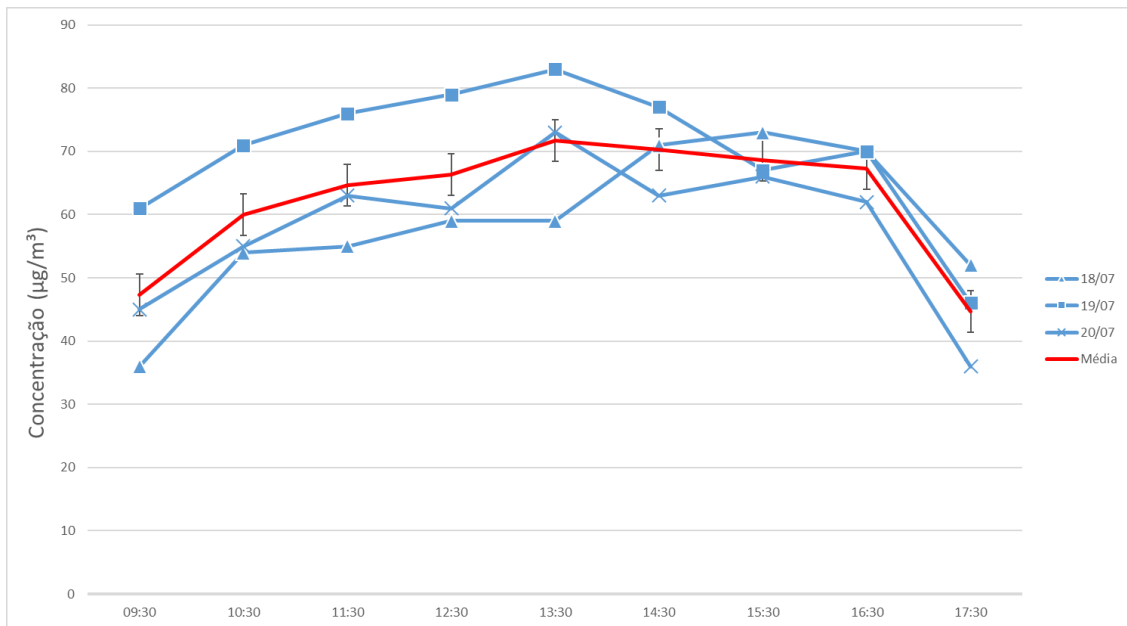


Figura 12 – Perfis diários de O<sub>3</sub>

As amostragens foram realizadas nos dias 18, 19 e 20 de julho de 2018, no mesmo local, em dias ensolarados e com ventos constantes na maior parte do dia, porém, mais intensos na parte da manhã. O O<sub>3</sub> apresentou perfil diário característico para dias sem nebulosidade, com baixas concentrações na parte da manhã e atingindo um pico na faixa horária das 13:30 no primeiro dia, das 15:30 no segundo e das 16:30 no último dia, com o decaimento das concentrações após este horário, quando a intensidade de radiação solar disponível diminui consideravelmente.

As medidas indicam baixas concentrações nos horários medidos, com valores bem abaixo do padrão primário de 140 µg/m<sup>3</sup> nos três dias. Isso pode estar relacionado com a época do ano (mês de julho), período em que a radiação solar é menos intensa na região dificultando a formação do O<sub>3</sub>. O ozônio, por ser um poluente secundário, forma-se depois que os poluentes precursores, como os COV's e NOX, são emitidos na atmosfera por veículos. Como o local de amostragem tem intensa movimentação de veículos de grande e pequeno porte e está entre duas grandes avenidas, formam-se corredores de vento no local, também conhecidos como canyons urbanos, o que pode levar a formação do ozônio para outros locais.

A baixa concentração medida pode estar relacionada também à interferência do prédio do terminal central no local, servindo como barreira física para a livre circulação dos gases e poluentes.

## 5.5 COMPARAÇÃO DO DADOS DE CONCENTRAÇÃO COM DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR NAS AMOSTRAGENS DE PERFIL DIÁRIO

A seguir, é mostrada a relação dos dados de concentração do perfil diário de  $O_3$  com a radiação solar para os mesmos dias e horários (Figuras 13, 14 e 15). Estes dados de radiação estão disponíveis no Apêndice F.

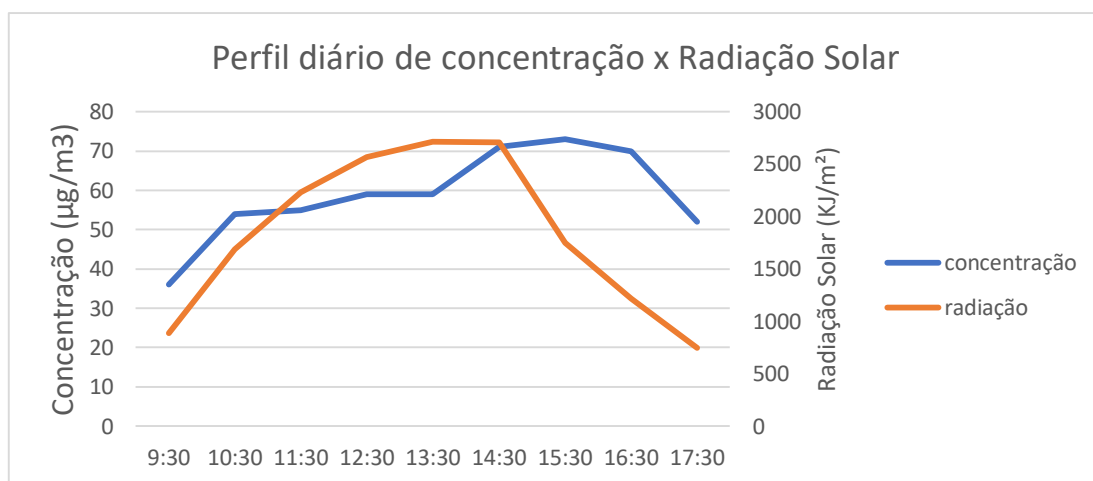


Figura 13 - Perfil diário da concentração do  $O_3$  e da radiação solar medidos no dia 18 de julho de 2018.

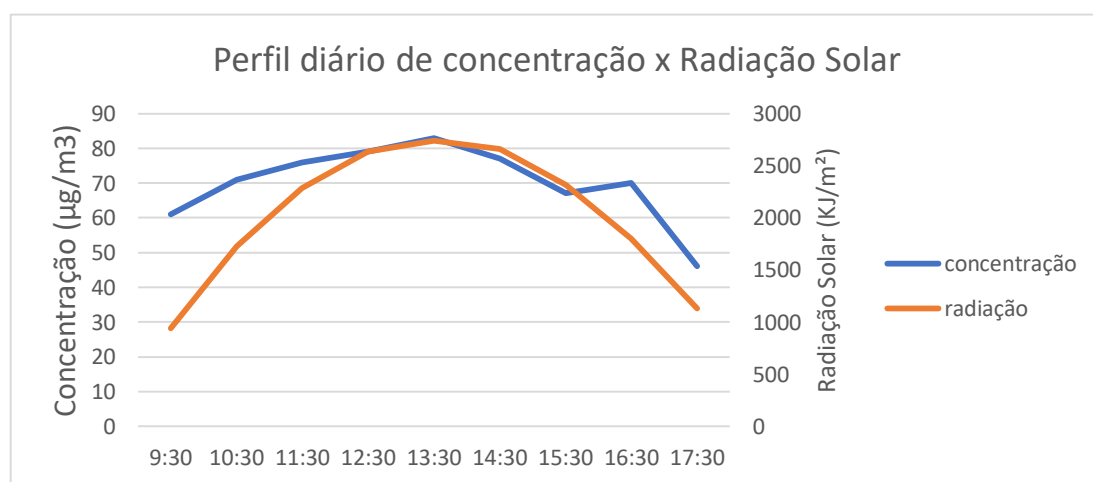


Figura 14 - Perfil diário da concentração do  $O_3$  e da radiação solar medidos no dia 19 de julho de 2018.

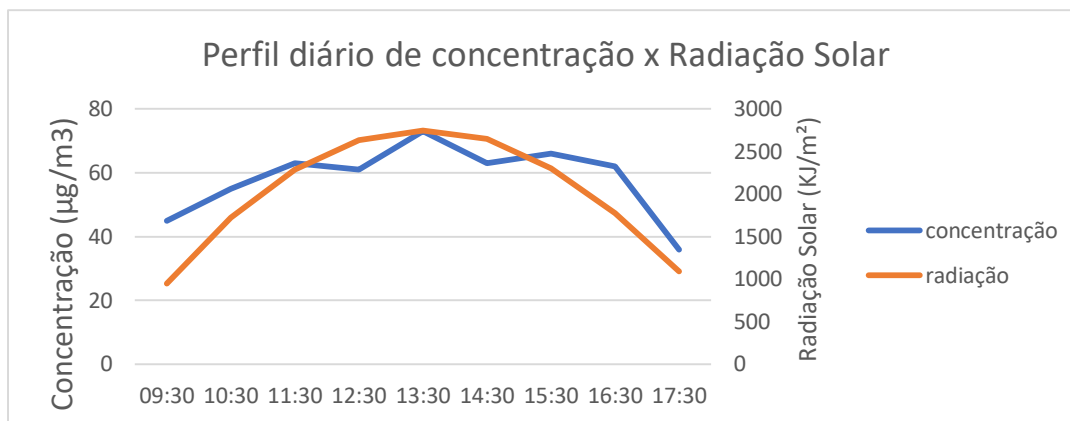


Figura 15 - Perfil diário da concentração do O<sub>3</sub> e da radiação solar medidos no dia 20 de julho de 2018.

Visto que as amostragens foram feitas ao longo do dia, os valores do eixo das abcissas representam as horas, de 9:30 às 17:30 horas. Nesse intervalo, somente os dados medidos no dia 18 de julho representam o perfil onde a concentração de ozônio aumenta com o aumento da radiação solar, atingindo um pico por volta das 15h horas da tarde (Barboza Chiquetto, *et al*, 2016).

Outros fatores podem ter influenciado nos perfis mostrados nas figuras 14 e 15 como a velocidade dos ventos, a temperatura relativamente baixa nessa época do ano e até o próprio local das amostragens, como já comentado em tópicos anteriores, que pode sofrer influência direta de construções e correntes de ar que se formam com o cruzamento de duas avenidas movimentadas da cidade e levam à formação do ozônio para outros locais.

## 5.6 DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA DAS AMOSTRAGENS

A Figura 16 mostra as concentrações de O<sub>3</sub> agrupadas pelo horário de medidas. Não foram colocadas todas as amostragens feitas por problemas de preenchimento dos formulários, ou seja, muitas medidas não apresentavam o horário em que foram medidas as concentrações. A maior parte dos dados foram coletados entre meio dia e uma hora da tarde por motivo de disponibilidade das pessoas envolvidas e podem ser consultados no Apêndice G deste trabalho.

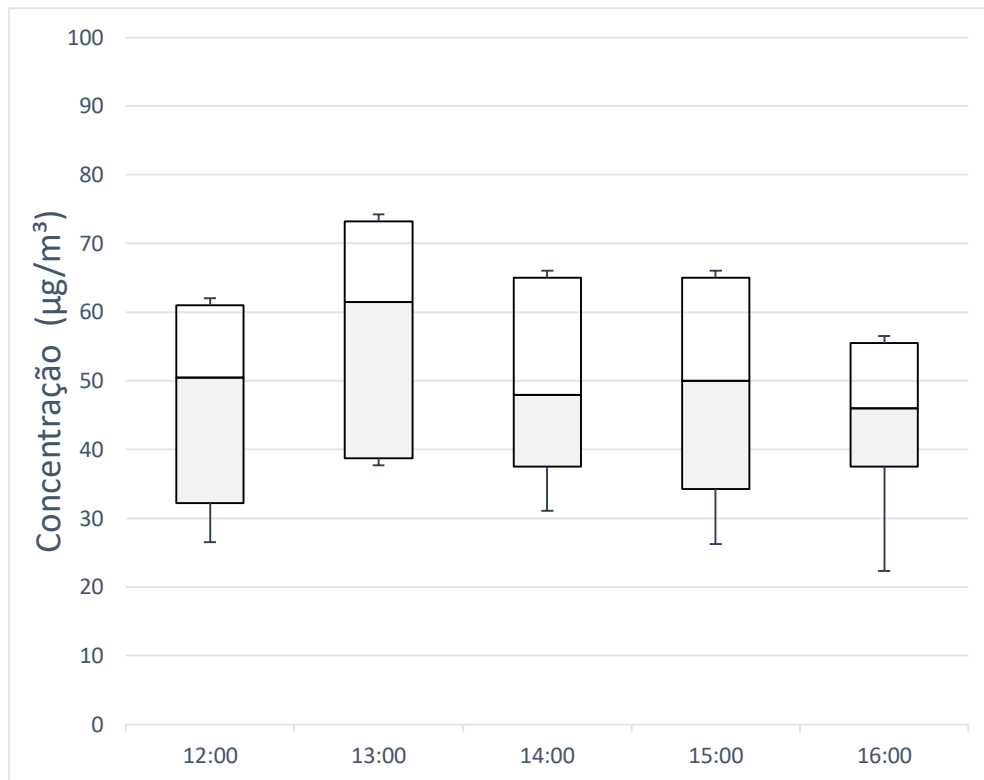


Figura 16 - Distribuição horária das médias

De acordo com YING, TIE e LI, 2009, as concentrações de O<sub>3</sub> troposférico atingem o seu pico por volta das 15 horas e tendem a cair durante a noite, porém, o diagrama de blocos para as medidas no terminal central não mostra uma variação clara, com a mediana dos blocos ficando em torno dos 50 µg/m<sup>3</sup> em todos os horários. Vale ressaltar que 49% das medidas foram ao meio dia e que 17% das medidas foram feitas no horário de pico de radiação solar, o que pode ter contribuído para a baixa mediana das 15 horas em relação aos outros horários.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou avaliar o perfil da formação do poluente ozônio troposférico e o monitoramento de suas concentrações ao longo do ano na cidade de Uberlândia situada no Triângulo Mineiro de Minas Gerais.

Com o estudo das concentrações ao longo do ano, pôde-se concluir que os maiores valores de concentração no local de coleta foram obtidos nos meses entre setembro e novembro, um efeito que pode se relacionar com o aumento da radiação solar nessa época do ano. E os valores menores estão identificados no período de maior pluviometria na cidade, o que

reforça a qualidade de limpante atmosférica que a chuva tem e que melhora a qualidade do ar como um todo, sendo de grande benefício para a população.

Com a análise de todos os 6.720 dados de concentração coletados ao longo do ano, não houve ultrapassagem do limite estabelecido pelo CONAMA 491/18 de 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de ar, no entanto, é importante lembrar que o CONAMA estabelece 8 horas como tempo de amostragem para avaliação de ultrapassagem do padrão primário, o que não foi possível neste estudo.

Os dados indicam que o horário de maior concentração de  $\text{O}_3$  é entre 13:30 e 16:30, no entanto, mais medidas de perfis de concentração ao longo do dia são necessárias. Estes resultados sugerem que novas medidas deste poluente poderiam ser concentradas em torno deste horário. No entanto, precisa-se fazer testes em outras localidades da cidade para verificar se há locais mais adequados no sentido de representatividade das medidas.

Com relação ao local das amostragens, pode ser interessante investigar locais mais à frente, na direção predominante dos ventos, onde pode ocorrer picos de formação de ozônio troposférico. Além disso, buscar um local sem interferência de construções ao seu redor e com boa incidência de radiação solar, para isso deve-se fazer testes em alguns pontos até encontrar o ideal.

Outro ponto que convém destacar é o equipamento utilizado. É recomendado que se descarte os primeiros 10 dados gerados por ele, em torno dos 10 a 15 primeiros minutos, visto que este tempo é necessário para que o sensor esteja apto a medir.

Para uma melhor representatividade e confiabilidade das medidas de  $\text{O}_3$  troposférico em Uberlândia, é importante que as sugestões e recomendações aqui apresentadas sejam levadas em consideração para o monitoramento nos anos seguintes.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Andrade, Fornaro, Maria de Fátima, A., Edmilson Dias de, F., Mazzoli, C. R., Martins, L. D., Boian, C., ... Leme, N. P. (2012). Ozone sounding in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil: Wet and dry season campaigns of 2006. *Atmospheric Environment*, 61, 627–640. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.083>

Atkinson, R., & Arey, J. (2003). Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: A review. *Atmospheric Environment*, 37(SUPPL. 2), 197–219.

[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00391-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00391-1)

Barboza Chiquetto, J., Yuri Ynoue, R., Cabral-Miranda, W., & Elisa Siqueira Silva, M. (2016). Concentrações de ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo e a implementação de parques urbanos: observações e modelagem. *Boletim Paulista de Geografia*, 95(Especial Workshop Geografia Física), 1–24.

Carbone, S. (2008). *Modelagem De Ozônio Troposférico Em Regiões Urbanas - Aperfeiçoamento Do Módulo Químico No Modelo Cit.* 112.

Carrijo, B. R., & Baccaro, C. A. D. (2000). Análise Sobre a Erosão Hídrica Na Área Urbana De Uberlândia ( Mg ). *Caminhos De Geografia*, 1(2), 70–83. <https://doi.org/10.1177/0008125617725288>

CETESB, Relatório Anual da Qualidade do Ar do Estado de São Paulo, 2011, Divisão de Análise de dados, São Paulo, 2012.

Colón M, Pleil JD, Hartlage TA, Guardani ML, Martins MH. Survey of volatile organic compounds associated with automotive emissions in the urban airshed of São Paulo, Brazil. *Atmos Environ* 2001;35:4017–31.

Complexo Parque do Sábia. Disponível em <<http://www.uberlandia.mg.gov.br/2014/secretaria-pagina/51/144/secretaria.html>> Acesso em 10 de julho de 2018.

Corrêa SM. Qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro: sinergia entre simulação e monitoramento. 2003. PhD Thesis — Federal University of Rio de Janeiro.

Dutra, E. G., Fioravante, E. F., & Ferreira, F. D. (2009). *Emissão veicular e o ozônio troposférico na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.* 29–33.

Felzer, B. S., Cronin, T., Reilly, J. M., Melillo, J. M., & Wang, X. (2007). Impacts of ozone on trees and crops. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(11–12), 784–798. <https://doi.org/10.1016/J.CRTE.2007.08.008>

Finlayson-Pitts, B. J., Pitts J. N. Jr., (2000). Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere Theory, Experiments, and Applications. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-257060-5.X5000-X>

IBGE disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>> Acesso em 04 de abril de 2018.

IBGE disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/pesquisa/22/0/>> Acesso em 20 de novembro de 2019.

Guimarães, P. R. B. (2008). Estimação de Parâmetros. *Métodos Quantitativos Estatísticos*, 19–23. <https://doi.org/10.1016/B978-85-352-3030-7.50007-3>

Manual Aeroqual portable 200 Series. Disponível em:



<<https://www.manualslib.com/manual/829192/Aeroqual-200-Series.html#manual>>  
Acesso em 04 de abril de 2018.

Mozeto, A. A. Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, p. 41-49, 2001.

NEI, 2005. National Emissions Inventory Data & Documentation, Environmental Protection Agency (EPA), U.S.

Orlando, J. P., Alvim, D. S., Yamazaki, A., Corrêa, S. M., & Gatti, L. V. (2010). Ozone precursors for the São Paulo Metropolitan Area. *Science of the Total Environment*, 408(7), 1612–1620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.060>

Pires, D. (2005). *Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. 194.

Polli, D. G. (2011). *Medições De Ozônio Troposférico No Campus Central Da Ufpr , Curitiba , Pr Medições De Ozônio Troposférico No*.

Reid, N., Yap, D., & Bloxam, R. (2008). The potential role of background ozone on current and emerging air issues: An overview. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 1(1), 19–29. <https://doi.org/10.1007/s11869-008-0005-z>

Resolução N° 491/18, de 19 de novembro de 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>> Acesso em 26 de abril de 2019.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *ATMOSPHERIC From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION*.

Silva, P. C. R. . Site do Professor Paulo Cezar com material didático. 2016. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Educacional).

Stathopoulou, E., Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Bagiorgas, H. S. (2008). On the impact of temperature on tropospheric Ozone concentration levels in urban environments. *Journal of Earth System Science*, 117(3), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0027-9>

YING, Z.M.; TIE, X.X.; LI, G.H. Sensitivity of ozone concentrations to diurnal variations of surface emissions in Mexico City: A WRF/Chem modeling study. *Atmospheric Environment*, v. 43, n. 4, p. 851-859, 2009

## 8. APÊNDICES

### 8.1 Apêndice A

<b>Dados brutos das amostragens de ozônio no ano de 2017 no terminal central de Uberlândia-MG</b>					
AMOSTRAGEM	DATA	mês	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
			Concentração média de 1 hora do dia	Valor Máximo obtido em 1 hora	Limite máximo permitido
1	03/01/2017	jan/17	48	103	140
2	06/01/2017		25	96	140
3	09/01/2017		11	45	140
4	12/01/2017		39	84	140
5	15/01/2017		72	96	140
6	18/01/2017		14	44	140
7	21/01/2017		47	85	140
8	24/01/2017		40	81	140
9	27/01/2017		76	121	140
10	30/01/2017		13	40	140
11	02/02/2017	fev/17	74	108	140
12	05/02/2017		32	83	140
13	08/02/2017		33	83	140
14	11/02/2017		35	82	140
15	14/02/2017		45	94	140
16	17/02/2017		36	80	140
17	20/02/2017		3	31	140
18	23/02/2017		48	95	140
19	26/02/2017		82	102	140
20	01/03/2017	mar/17	39	68	140
21	04/03/2017		41	66	140
22	07/03/2017		72	120	140
23	10/03/2017		56	96	140
24	13/03/2017		36	75	140
25	16/03/2017		31	67	140
26	19/03/2017		65	103	140
27	22/03/2017		25,9	65	140
28	25/03/2017		76,0	125	140
29	28/03/2017		29,0	75	140
30	03/04/2017	abr/17	54,0	97	140
31	06/04/2017		21,0	46	140
32	09/04/2017		44,0	75	140
33	12/04/2017		57,0	121	140
34	15/04/2017		46,0	82	140
35	18/04/2017		62,0	113	140
36	21/04/2017		29,0	41	140
37	24/04/2017		29,1	56	140
38	27/04/2017		28,0	55	140
39	30/04/2017		32,0	62	140
40	03/05/2017	mai/17	27,0	49	140
41	06/05/2017		62,0	97	140
42	09/05/2017		51,0	125	140
43	12/05/2017		49,0	89	140
44	15/05/2017		23,0	38	140
45	18/05/2017		42,0	73	140
46	21/05/2017		36,0	74	140
47	24/05/2017		8,8	38	140
48	27/05/2017		16,8	53	140
49	30/05/2017		27,7	81	140

50	02/06/2017	jun/17	34,0	57	140
51	05/06/2017		49,0	78	140
52	08/06/2017		53,0	82	140
53	11/06/2017		81,0	102	140
54	14/06/2017		29,0	57	140
55	17/06/2017		41,0	81	140
56	20/06/2017		85,0	128	140
57	23/06/2017		29,9	64	140
58	26/06/2017		44,7	65	140
59	29/06/2017		18,0	51	140
60	02/07/2017	jul/17	68,0	92	140
61	05/07/2017		38,0	61	140
62	08/07/2017		48,0	82	140
63	11/07/2017		24,0	59	140
64	14/07/2017		35,0	62	140
65	17/07/2017		29,0	97	140
66	20/07/2017		56,0	101	140
67	23/07/2017		85,0	127	140
68	26/07/2017		51,0	87	140
69	29/07/2017		52,0	88	140
70	02/08/2017	ago/17	39,0	68	140
71	05/08/2017		41,0	66	140
72	08/08/2017		72,0	120	140
73	11/08/2017		56,0	96	140
74	14/08/2017		36,0	75	140
75	17/08/2017		31,0	67	140
76	20/08/2017		65,0	103	140
77	03/09/2017	set/17	67,0	108	140
78	06/09/2017		41,0	84	140
79	09/09/2017		61,0	99	140
80	12/09/2017		32,0	61	140
81	15/09/2017		46,0	79	140
82	18/09/2017		48,0	81	140
83	24/09/2017		55,0	81	140
84	27/09/2017		53,0	85	140
85	30/09/2017		70,0	95	140
86	03/10/2017	out/17	71,0	116	140
87	06/10/2017		54	80	140
88	09/10/2017		84,0	143	140
89	12/10/2017		82,0	112	140
90	15/10/2017		95,0	156	140
91	18/10/2017		54,0	77	140
92	21/10/2017		82,0	138	140
93	24/10/2017		63,0	89	140
94	27/10/2017		106,0	143	140
95	02/11/2017	nov/17	63,0	87	140
96	05/11/2017		74,0	92	140
97	08/11/2017		50,0	75	140
98	11/11/2017		77,0	110	140
99	14/11/2017		101,0	141	140
100	17/11/2017		23,0	58	140
101	20/11/2017		71,0	99	140
102	24/11/2017		22,0	49	140
103	26/11/2017		65,0	92	140
104	29/11/2017		58,0	93	140
105	02/12/2017	dez/17	52,0	77	140
106	05/12/2017		15,0	59	140
107	08/12/2017		6,0	36	140
108	11/12/2017		10,0	38	140
109	20/12/2017		38,0	64	140
110	23/12/2017		29,0	50	140
111	26/12/2017		36,0	63	140
112	29/12/2017		54,0	77	140

## 8.2 Apêndice B

Diagrama de caixas usando os valores das médias horárias dos meses do ano de 2017												
AMOSTRAGEM EM ORDEM CRESCENTE	MESES											
	Concentração média de 1 hora do dia ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )											
	jan/17	fev/17	mar/17	abr/17	mai/17	jun/17	jul/17	ago/17	set/17	out/17	nov/17	dez/17
1	11	3	25,9	21,0	8,8	18,0	24,0	31,0	32,0	54	22,0	6,0
2	13	32	29,0	28,0	16,8	29,0	29,0	36,0	41,0	54,0	23,0	10,0
3	14	33	31	29,0	23,0	29,9	35,0	39,0	46,0	63,0	50,0	15,0
4	25	35	36	29,1	27,0	34,0	38,0	41,0	48,0	71,0	58,0	29,0
5	39	36	39	32,0	27,7	41,0	48,0	56,0	53,0	82,0	63,0	36,0
6	40	45	41	44,0	36,0	44,7	51,0	65,0	55,0	82,0	65,0	38,0
7	47	48	56	46,0	42,0	49,0	52,0	72,0	61,0	84,0	71,0	52,0
8	48	74	65	54,0	49,0	53,0	56,0		67,0	95,0	74,0	54,0
9	72	82	72	57,0	51,0	81,0	68,0		70,0	106,0	77,0	
10	76		76,0	62,0	62,0	85,0	85,0				101,0	

Min NO	11,0	32,0	25,9	21,0	8,8	18,0	24,0	31,0	32,0	54,0	22,0	6,0
Q1	16,8	33,0	32,3	29,0	24,0	30,9	35,8	37,5	46,0	63,0	52,0	13,8
Mediana	39,5	36,0	40,0	38,0	31,8	42,9	49,5	41,0	53,0	82,0	64,0	32,5
Q3	47,8	48,0	62,8	52,0	47,3	52,0	55,0	60,5	61,0	84,0	73,3	41,5
Max NO	76,0	48,0	76,0	62,0	62,0	81,0	68,0	72,0	70,0	106,0	101,0	54,0

Lim inf	-29,8	10,5	-13,5	-5,4	-10,9	-0,7	6,9	3,0	23,5	31,5	20,1	-27,9
IIQ	31,0	15,0	30,5	23,0	23,3	21,1	19,3	15,0	15,0	21,0	21,3	27,8
Lim Sup	94,3	70,5	108,5	86,5	82,1	83,6	83,9	95,0	83,5	115,5	105,1	83,1

Mínimo	5,8	1,0	6,4	8,0	15,2	12,9	11,8	6,5	14,0	9,0	30,0	7,8
Q1	16,8	33,0	32,3	29,0	24,0	30,9	35,8	37,5	46,0	63,0	52,0	13,8
Mediana	22,8	3,0	7,8	9,0	7,8	11,9	13,8	3,5	7,0	19,0	12,0	18,8
Q3	8,3	12,0	22,8	14,0	15,4	9,1	5,5	19,5	8,0	2,0	9,3	9,0
Maximo	28,3	0,0	13,2	10,0	14,8	29,0	13,0	11,5	9,0	22,0	27,8	12,5

Outliers inferiores		3										
Outliers superiores		82				85	85					

## 8.3 Apêndice C

Médias mensais de O <sub>3</sub>	
Mês	Concentração mensal média de O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
jan/17	38,5
fev/17	43,1
mar/17	47,1
abr/17	40,2
mai/17	34,3
jun/17	46,5
jul/17	48,6
ago/17	48,6
set/17	52,6
out/17	76,8
nov/17	60,4
dez/17	30,0

## 8.4 Apêndice D

Dados de radiação solar e concentração de ozônio dia a dia										
Amostragem	data	mês	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Radiação Solar (MJ/m <sup>2</sup> .dia)	Amostragem	data	mês	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Radiação Solar (MJ/m <sup>2</sup> .dia)	
1	03/01/2017	jan/17	48	25,77	57	23/06/2017	jun/17	29,9	16,30	
2	06/01/2017		25	22,85	58	26/06/2017		44,7	17,16	
3	09/01/2017		11	11,07	59	29/06/2017	18,0	17,17		
4	12/01/2017		39	23,26	60	02/07/2017	68,0	17,64		
5	15/01/2017		72	11,45	61	05/07/2017	38,0	17,01		
6	18/01/2017		14	6,96	62	08/07/2017	48,0	15,12		
7	21/01/2017		47	13,73	63	11/07/2017	24,0	17,43		
8	24/01/2017		40	20,49	64	14/07/2017	35,0	18,70		
9	27/01/2017		76	16,87	65	17/07/2017	29,0	18,31		
10	30/01/2017		13	27,06	66	20/07/2017	56,0	18,40		
11	02/02/2017	fev/17	74	24,26	67	23/07/2017	jul/17	85,0	18,82	
12	05/02/2017		32	19,12	68	26/07/2017		51,0	19,67	
13	08/02/2017		33	17,91	69	29/07/2017	52,0	19,52		
14	11/02/2017		35	19,25	70	02/08/2017	39,0	19,05		
15	14/02/2017		45	26,95	71	05/08/2017	41,0	19,81		
16	17/02/2017		36	20,15	72	08/08/2017	72,0	15,91		
17	20/02/2017		3	24,24	73	11/08/2017	56,0	19,75		
18	23/02/2017		48	28,50	74	14/08/2017	36,0	9,43		
19	26/02/2017		82	13,94	75	17/08/2017	31,0	15,95		
20	01/03/2017		39	14,31	76	20/08/2017	65,0	17,11		
21	04/03/2017	mar/17	41	21,20	77	03/09/2017	ago/17	67,0	23,19	
22	07/03/2017		72	20,71	78	06/09/2017		41,0	23,71	
23	10/03/2017		56	20,12	79	09/09/2017	61,0	23,44		
24	13/03/2017		36	25,15	80	12/09/2017	32,0	23,82		
25	16/03/2017		31	25,78	81	15/09/2017	46,0	24,37		
26	19/03/2017		65	19,87	82	18/09/2017	48,0	24,50		
27	22/03/2017		25,9	19,61	83	24/09/2017	55,0	20,10		
28	25/03/2017		76,0	16,47	84	27/09/2017	53,0	18,65		
29	28/03/2017		29,0	16,32	85	30/09/2017	70,0	6,11		
30	03/04/2017		54,0	21,66	86	03/10/2017	71,0	17,22		
31	06/04/2017	21,0	6,34	87	06/10/2017	54	25,97			
32	09/04/2017	abr/17	44,0	21,81	88	09/10/2017	set/17	84,0	25,75	
33	12/04/2017		57,0	18,00	89	12/10/2017		82,0	27,46	
34	15/04/2017		46,0	20,90	90	15/10/2017	95,0	25,07		
35	18/04/2017		62,0	20,82	91	18/10/2017	54,0	26,81		
36	21/04/2017		29,0	7,67	92	21/10/2017	82,0	19,79		
37	24/04/2017		29,1	20,39	93	24/10/2017	63,0	21,55		
38	27/04/2017		28,0	11,90	94	27/10/2017	106,0	20,63		
39	30/04/2017		32,0	17,45	95	02/11/2017	63,0	19,20		
40	03/05/2017		mai/17	27,0	19,97	96	05/11/2017	out/17	74,0	9,70
41	06/05/2017			62,0	15,66	97	08/11/2017		50,0	16,85
42	09/05/2017	51,0		20,78	98	11/11/2017	77,0	15,54		
43	12/05/2017	49,0		19,80	99	14/11/2017	101,0	29,84		
44	15/05/2017	23,0		11,82	100	17/11/2017	23,0	14,19		
45	18/05/2017	42,0		14,83	101	20/11/2017	71,0	21,45		
46	21/05/2017	36,0		12,65	102	24/11/2017	22,0	20,82		
47	24/05/2017	8,8		17,11	103	26/11/2017	65,0	8,61		
48	27/05/2017	16,8		14,31	104	29/11/2017	58,0	22,80		
49	30/05/2017	27,7		15,96	105	02/12/2017	52,0	12,28		
50	02/06/2017	jun/17	34,0	14,82	106	05/12/2017	nov/17	15,0	23,85	
51	05/06/2017		49,0	17,98	107	08/12/2017		6,0	15,08	
52	08/06/2017		53,0	18,01	108	11/12/2017	10,0	14,56		
53	11/06/2017		81,0	17,45	109	20/12/2017	38,0	25,96		
54	14/06/2017		29,0	13,84	110	23/12/2017	29,0	19,82		
55	17/06/2017		41,0	17,98	111	26/12/2017	36,0	18,08		
56	20/06/2017		85,0	15,20	112	29/12/2017	54,0	24,87		

## 8.5 Apêndice E

<b>Dados do perfil diário</b>				
	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) □			
Horário	18/jul	19/jul	20/jul	Média
09:30	36	61	45	47,3
10:30	54	71	55	60,0
11:30	55	76	63	64,7
12:30	59	79	61	66,3
13:30	59	83	73	71,7
14:30	71	77	63	70,3
15:30	73	67	66	68,7
16:30	70	70	62	67,3
17:30	52	46	36	44,7

### 8.6 Apêndice F

<b>Dados de radiação solar e concentração de ozônio para o perfil diário</b>				
codigo_estacao	data	hora	Radiação Solar ( $\text{KJ}/\text{m}^2$ )	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
A 507	18/07/2018	09:30	889,6	36
		10:30	1685	54
		11:30	2232	55
		12:30	2569	59
		13:30	2713	59
		14:30	2710	71
		15:30	1748	73
		16:30	1220	70
		17:30	747,2	52
A 507	19/07/2018	09:30	940,3	61
		10:30	1728	71
		11:30	2288	76
		12:30	2635	79
		13:30	2741	83
		14:30	2660	77
		15:30	2319	67
		16:30	1801	70
A 507	20/07/2018	09:30	951,3	45
		10:30	1720	55
		11:30	2284	63
		12:30	2632	61
		13:30	2747	73
		14:30	2650	63
		15:30	2301	66
		16:30	1776	62
		17:30	1088	36

### 8.7 Apêndice G

<b>Diagrama de caixas para a distribuição horária das amostragens</b>						
Amostragem em ordem crescente	Concentração média de 1 hora do dia em $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
1	29,0	6,0	32,0	3,0	10,0	29,0
2		11,0	35,0	36,0	22,0	46,0
3		13,0	38,0	36,0	23,0	65,0
4		14,0	41,0	39,0	38,0	
5		15,0	53,0	45,0	48,0	
6		21,0	70,0	48,0	48,0	
7		24,0	71,0	61,0	52,0	
8		25,0	74,0	63,0	54	
9		32,0	77,0	67,0	63,0	
10		33,0	82,0	72,0	71,0	
11		35,0		95,0	82,0	
12		39,0			106,0	
13		40,0				
14		41,0				
15		47,0				
16		48,0				
17		50,0				
18		51,0				
19		52,0				
20		54,0				
21		54,0				
22		55,0				
23		56,0				
24		56,0				
25		58,0				
26		62,0				
27		68,0				
28		72,0				
29		74,0				
30		76,0				
31		82,0				
32		84,0				
33		85,0				
34		101,0				
<b>Min NO</b>		6	32	3	10	29
<b>Q1</b>		32,25	38,75	37,5	34,25	37,5
<b>Mediana</b>		50,5	61,5	48,0	50,0	46,0
<b>Q3</b>		61	73,25	65	65	55,5
<b>Max NO</b>		101	82	3	106	65
<b>Lim inf</b>		-10,875	-13	-3,75	-11,875	10,5
<b>IIQ</b>		28,75	34,5	27,5	30,75	18
<b>Lim Sup</b>		104,125	125	106,25	111,125	82,5
<b>Minimo</b>		26,25	6,75	34,5	24,25	8,5
<b>Q1</b>		32,25	38,75	37,5	34,25	37,5
<b>Mediana</b>		18,3	22,75	10,5	15,75	8,5
<b>Q3</b>		10,5	11,75	17	15	9,5
<b>Maximo</b>		40	8,75	-62	41	9,5
<b>Outliers inferiores</b>						
<b>Outliers superiores</b>						65

## 9. ANEXOS

### 9.1 Anexo A

**Médias mensais dos dados meteorológicos da estação  
Uberlândia-A507, fornecidas pelo INMET**

<b>Mês</b>	<b>Chuva a média (mm)</b>	<b>Radiação Solar média (MJ/m<sup>2</sup>.dia)</b>	<b>Temperatura média ( °C)</b>	<b>Umidade Relativa média (%)</b>	<b>Velocidade média do vento (m/s)</b>	<b>Pressão média (hPa)</b>
<b>jan/17</b>	7,4	19,4	24,1	72,1	1,4	916,2
<b>fev/17</b>	7,6	21,7	24,3	68,1	1,6	916,0
<b>mar/17</b>	4,8	19,4	24,5	67,2	1,3	916,3
<b>abr/17</b>	1,6	17,7	23,8	65,9	1,5	917,3
<b>mai/17</b>	2,1	16,6	22,5	63,6	1,4	918,3
<b>jun/17</b>	0,0	16,7	20,9	57,0	1,6	920,4
<b>jul/17</b>	0,0	17,5	19,0	49,5	1,8	923,3
<b>ago/17</b>	0,0	18,8	23,2	40,6	1,6	918,8
<b>set/17</b>	0,9	22,3	24,3	34,0	2,0	919,5
<b>out/17</b>	3,1	21,8	26,0	46,0	1,8	915,8
<b>nov/17</b>	9,9	19,6	23,4	70,6	1,6	914,5
<b>dez/17</b>	7,7	18,7	24,0	72,4	1,4	914,6