**WALTER APARECIDO BEZERRA**

# Arduino, reações químicas colorimétricas e amostrador passivo no estudo de dióxido de nitrogênio, $NO_2$, e ozônio, $O_3$, na atmosfera de Rondonópolis, MT

Dissertação apresentada ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química.

Orientador: Arnaldo Alves Cardoso
Coorientador: João Flávio da Silveira Petruci

**ARARAQUARA**
**2023**

B574a

Bezerra, Walter Aparecido

Arduino, reações químicas colorimétricas e amostrador passivo no estudo de dióxido de nitrogênio, NO2, e ozônio, O3, na atmosfera de Rondonópolis, MT / Walter Aparecido Bezerra. -- Araraquara, 2023

120 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Química, Araraquara

Orientador: Arnaldo Alves Cardoso

Coorientador: João Flavio da Silveira Petruci

1. Poluição atmosférica. 2. Incêndios florestais. 3. Ozônio atmosférico. 4. Arduino (Controlador programável). 5. Amostragem ambiental. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Arduino, reações químicas colorimétricas e amostrador passivo no estudo de dióxido de nitrogênio, $NO_2$, e ozônio, $O_3$, na atmosfera de Rondonópolis, MT"

**AUTOR: WALTER APARECIDO BEZERRA**
**ORIENTADOR: ARNALDO ALVES CARDOSO**
**COORIENTADOR: JOAO FLAVIO DA SILVEIRA PETRUCI**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Química, pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ARNALDO ALVES CARDOSO
Data: 25/08/2023 17:59:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. ARNALDO ALVES CARDOSO (Participaçao Virtual)
Departamento de Quimica Analitica, Fisico-Quimica e Inorganica / Instituto de Quimica - UNESP – Araraquara

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDREA ROSANE DA SILVA
Data: 25/08/2023 18:41:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. ANDREA ROSANE DA SILVA (Participaçao Virtual)
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET – Valença

Janiciara Botelho Silva

Profa. Dra. JANICIARA BOTELHO SILVA (Participaçao Virtual)
Instituto Federal do Piauí - IFPI - Parnaíba

Araraquara, 25 de agosto de 2023

## IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Ampliar o conhecimento sobre as concentrações de $NO_2$ e $O_3$ na área urbana de Rondonópolis ao longo de um ano contribui para informar a população, mas principalmente ajudar a direcionar a construção de políticas públicas atuais e futuras referente ao desenvolvimento sustentável do município. Saber sobre a qualidade do ar é muito relevante, pois a poluição atmosférica está ligada não só a muitos problemas de saúde coletiva, mas também a prejuízos econômicos para a sociedade pois os poluentes são determinantes na deterioração de materiais como borrachas, tintas e tecidos sintéticos e diminuição da produtividade agrícola. Os danos podem atingir diversas atividades agrícolas incluindo a soja e o milho que são duas culturas muito presentes na região de Rondonópolis.

Outro objetivo deste trabalho foi construir e testar um equipamento fotométrico de baixo custo utilizando LED como fonte luminosa e sensor de luminosidade TSL 2561 microcontrolados por placa Arduino Uno. Instrumentos de baixo custo podem contribuir para a democratização da Química Analitica e várias outras áreas incluindo a educacional, principalmente para aquelas situações em que se tenha menos recursos disponíveis para desenvolver por exemplo métodos analíticos caros.

## POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Expanding knowledge about $NO_2$ and $O_3$ concentrations in the urban area of Rondonópolis over a year contributes to informing the population, but mainly helps guide the construction of current and future public policies regarding the sustainable development of the municipality. Knowing about air quality is very relevant, as air pollution is linked not only to many public health problems, but also to economic losses for society, since pollutants are determinant in the deterioration of materials such as rubber, paints and synthetic fabrics and in the reduction of agricultural productivity. The damage can affect several agricultural activities, including soy and corn, which are two crops that are very present in the Rondonópolis region.

Another objective of this work was to build and test a low-cost photometric equipment using LEDs as a light source and a TSL 2561 light sensor microcontrolled by an Arduino Uno board to help with analytical determinations, these instruments contribute to the democratization of Analytical Chemistry but also to several other areas, including education, mainly for those situations where there are fewer resources available to develop, for example, expensive analytical methods.

# DADOS CURRICULARES

## IDENTIFICAÇÃO

**Nome:** Walter Aparecido Bezerra

**Nome em citações bibliográficas:** BEZERRA, W. A.

## FORMAÇÃO ACADÊMICA

2003-2006: Licenciatura Plena em Química.
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, UEMS, Brasil.

## PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

III Workshop do PPGEO - UFR. Questões socioambientais e o planejamento territorial na amazônia legal. 2022.

20º Encontro Nacional de Química Analítica (ENQA) - 8 º Congresso Ibero-Americano de Química Analítica (CIAQA) - Bento Gonçalves - RS- **Pôster:** Adaptation of analytical methods for determination of nitrogen dioxide and ozone in the atmosphere of Rondonopolis, MT. 2022.

46ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Águas de Lindóia - SP **Pôster:** Increased $NO_2$ and $O_3$ atmosphere concentrations in Rondonópolis - MT as a due of Amazonas, Pantanal, and Cerrado fires. 2023.

46ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Águas de Lindóia - SP **Sessão Coordenada: Química Ambiental I:** Increased $NO_2$ and $O_3$ atmosphere concentrations in Rondonópolis - MT as a due of Amazonas, Pantanal, and Cerrado fires. 2023.

III SeqWeb Química do IFPI Campus Parnaíba - Palestrante do evento **Minicurso**: Uso de Arduino, reações químicas colorimétricas e amostrador passivo no estudo de dióxido de nitrogênio ($NO_2$), e ozônio ($O_3$), atmosférico.2023.

## ATUAÇÃO PROFISSIONAL

Tem experiência na área de Tratamento de Água, Operação de Caldeiras de Alta Pressão, Ensino de Química na Educação Básica, Técnico Profissionalizante e Curso Pré-vestibular.

**Dedico este trabalho ao bom Deus e a todos que me auxiliaram na sua construção.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu bom Deus por ter me concedido os meios necessários para a conclusão deste trabalho, principalmente saúde.

Ao professor Arnaldo Alves Cardoso, possui um curriculum como poucos e gosta de ensinar, tive sorte em encontrá-lo, me orgulho muito em tê-lo como orientador.

A minha esposa Eliane, aos meus filhos João Gabriel e Maria Vitória minha base, sem eles tudo seria mais difícil.

Aos meus pais Francisco (in memoriam) e Maria que apesar de não terem estudado formalmente sabiam o valor da Educação, e desde cedo me ensinaram o quão fundamental ela é.

Aos meus irmãos Valdenir e Valéria que sempre torceram e acreditaram no sucesso dos meus projetos.

Ao Ivo Kochhann (in memoriam) e Maria Elizabete Rambo Kochhann (Bete) pela amizade e incentivos em uma época que precisei muito.

Ao professor João Flávio da Silveira Petruci, pelos ensinamentos e paciência.

Ao Juliano Passaretti Filho pela generosidade e apoio nas horas de aperto.

Ao Marcus Catai por ter me auxiliado em muitos momentos de dúvidas.

Ao Gabriel Baroffaldi por ter ajudado nos meus primeiros passos nos trabalhos de impressão D3 no laboratório do IQ da UNESP.

A professora Letícia Goulart por ter permitido meu acesso ao laboratório de Ciências Básicas da UFR para desenvolver parte da minha pesquisa.

Ao professor Helder Lopes Teles por ter se prontificado a ajudar.

Aos técnicos do laboratório de Ciências Básicas da UFR, Milene e Henrique, cujo excelente trabalho fez toda diferença.

A todos meus professores e colegas da época da graduação na UEMS, foi lá que o desejo pelo mestrado começou.

A SEDUC MT pela concessão de Licença Qualificação, uma política de Estado muito importante e fundamental para eu conseguir realizar o mestrado.

Ao Instituto de Química da UNESP Araraquara pela oportunidade em cursar o mestrado, esta que é uma renomada instituição cujo trabalho cientifico é importante para o desenvolvimento do país e merece todo apoio da sociedade.

*Tudo coopera para o bem daqueles que amam a Deus... Romanos 8:28.*

**RESUMO**

Ao longo de um ano foi realizado análise das concentrações de $NO_2$ e $O_3$ na área urbana de Rondonópolis e testado um equipamento fotométrico de baixo custo construído com LED, sensor de luminosidade TSL 2561 microcontrolados por placa Arduino Uno. As amostragens foram realizadas em seis localidades durante 8 e 24 horas utilizando amostradores passivos e filtros de celulose. Para coleta de $NO_2$, o filtro foi impregnado com trietanolamina 11% V/V e o reagente de Griess-Saltzman utilizado para determinação colorimétrica de um corante vermelho-violeta formado. Para ozônio, o filtro foi impregnado com índigo trissulfonado de potássio, nesta técnica há um descoramento do índigo que é proporcional ao ozônio atmosférico, o descoramento também foi analisado por colorimetria. O pico de ozônio ocorreu em setembro, valor superior ao limite de 51 ppb estabelecido pela legislação nacional. As amostras coletadas durante o período de 8 horas (dia) apresentaram concentrações de ozônio superiores àquelas obtidas no intervalo de tempo de 24 horas. Um pico de 83 ppb foi observado em amostras diurnas coletadas durante 8 horas. As massas de ar que chegaram a Rondonópolis, entre agosto e outubro, passaram por regiões do Pantanal, Amazônia e Cerrado onde ocorreram incêndios florestais, então é possível que o aumento de ozônio esteja relacionado ao aumento dos incêndios, pois o vento pode transportar poluentes por longas distâncias. O fotômetro testado apresentou resultados semelhantes a um espectrofotômetro comercial.

**Palavras-chave:** Poluição atmosférica; Incêndios florestais; Ozônio atmosférico; Arduino (Controlador programável); Amostragem ambiental.

**ABSTRAT**

Over the course of a year, an analysis of the concentrations of $NO_2$ and $O_3$ was carried out in the urban area of Rondonópolis and a low-cost photometric equipment built with LED, light sensor TSL 2561 microcontrolled by an Arduino Uno board was tested. Samplings were carried out in six locations during 8 and 24 hours using passive samplers and cellulose filters. For $NO_2$ collection, the filter was impregnated with 11% triethanolamine and the Griess-Saltzman reagent used for colorimetric determination of a red-violet dye formed. For ozone, the filter was impregnated with indigo trisulphonate of potassium, in this technique there is a bleaching of the indigo that is proportional to the atmospheric ozone, the bleaching was also analyzed by colorimetry. The ozone peak occurred in september, a value higher than the 51 ppb limit established by national legislation. The samples collected during the period of 8 hours (day) showed higher ozone concentrations than those obtained in the 24-hour period. A peak of 83 ppb was observed in daytime samples collected over 8 hours. The air masses that arrived in Rondonópolis, between august and october, passed through regions of the Pantanal, Amazon and Cerrado where forest fires occurred, so it is possible that the increase in ozone is related to the increase in fires, since the wind can transport pollutants through long distances. The tested photometer presented similar results to a commercial spectrophotometer.

**Keywords:** Atmospheric pollution; Forest fires; Atmospheric ozone; Arduino (Programmable Controller); Environmental sampling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Dados população frota veículos Rondonópolis 2010/2021 .....21
Figura 2:Mecanismo de formação do smog. .....30
Figura 3:Ozonólise da borracha. .....35
Figura 4:Esquema amostrador passivo. .....39
Figura 5:Reação do reagente de Griess Saltzman com $NO_2$. .....47
Figura 6:Reação do ozônio com índigo trissulfonado de potássio. .....48
Figura 7:Sensor TSL2561. .....51
Figura 8: Resposta espectral do sensor TSL 2561. .....52
Figura 9:Placa de Arduino UNO .....53
Figura 10:Display LCD 16:2 com módulo adaptador I2C .....53
Figura 11:Potenciômetro. .....54
Figura 12:Diodo emissor de luz (LED). .....54
Figura 13:Resistor de 330 Ohms.....55
Figura 14:Fonte chaveada. .....55
Figura 15:Código Fonte gerado pelo GPT chat. .....56
Figura 16: IDE (Ambiente de programação do Arduino). .....57
Figura 17:Esquema de ligação fotômetro “homemade”. .....57
Figura 18:Esquema porta cubeta fotômetro “homemade”. .....58
Figura 19:Fotômetro "homemade". .....58
Figura 20:Locais de instalação dos amostradores. .....59
Figura 21:Mapa indicação deslocamento instalação amostradores .....60
Figura 22:Local de amostragem Casa no bairro Vila Mineira. .....61
Figura 23:Instalação do amostrador no local Casa. .....62
Figura 24:Local de amostragem Daniel na Vila Operária. .....62
Figura 25:Instalação do amostrador na escola Daniel. .....63
Figura 26:Local amostragem Rodo no terminal rodoviário Alberto Luz. .....63
Figura 27:Amostrador instalado no terminal rodoviário .....64
Figura 28:Local de instalação amostrador Alfredo Marien. .....64
Figura 29:Amostrador instalado na escola Alfredo Marien. .....65
Figura 30:Local de amostragem no posto de combustíveis Aldo. .....65
Figura 31:Amostragem posto Aldo. .....66
Figura 32:Amostrador instalado no estacionamento da UFR. .....66
Figura 33:Local de amostragem na UFR. .....67
Figura 34:Espectrofotômetro Analyser e Fotômetro “Homemade”. .....68

Figura 35:Curva calibração para $NO_2$ utilizando o espectrofotômetro Global Analyser, com monitoramento em 550 nm. ..... 69
Figura 36:Curva de calibração para $NO_2$ com fotômetro "homemade" utilizando LED verde. ..... 70
Figura 37:Curvas calibração para $NO_2$ equipamentos Analyser e “homemade”. ..... 70
Figura 38:Curva calibração para ozônio com espectrofotômetro Global Analyser com monitoramento em 600 nm. ..... 72
Figura 39:Curva calibração para ozônio com fotômetro “homemade” utilizando LED Laranja. ..... 73
Figura 40:Curvas calibração para ozônio equipamentos Analyser e “homemade”. ..... 74
Figura 41:Planilha com fórmulas utilizadas no Excel para teste t -Student. ..... 76
Figura 42:Planilha utilizada no Excel para teste t -Student. ..... 76
Figura 43:Fotômetro “homemade” aberto. ..... 79
Figura 44:Quantidade de focos queimadas anual. ..... 81
Figura 45:Origem massas de ar Rondonópolis - Modelo de trajetórias Hysplit. ..... 81
Figura 46:Processos de Formação de $NO_2$ e ozônio. ..... 83
Figura 47:Concentrações de $NO_2$ em Rondonópolis entre 2021 e 2022 (Média 24 horas). ..... 84
Figura 48:Concentrações de ozônio em Rondonópolis entre 2021 e 2022 (Média 24 horas). ..... 85
Figura 49:Concentração de $NO_2$ e $O_3$ (Média 8 e 24 horas) em 14/07. ..... 86
Figura 50:Concentração de $NO_2$ e $O_3$ (Média 8 e 24 horas). ..... 87
Figura 51:Concentrações de $NO_2$ e $O_3$ em 14 de julho (Média 8 horas). ..... 88
Figura 52:Variações nas concentrações de ozônio x Radiação Solar em Rondonópolis. ..... 90
Figura 53:Variações nas concentrações de ozônio x Temperatura em Rondonópolis. ..... 91
Figura 54:Passo 1 para realizar teste t no Excel ..... 101
Figura 55:Passo 2 para realizar teste t no Excel ..... 101
Figura 56:Passo 3 para realizar teste t no Excel ..... 102
Figura 57:Passo 4 para realizar teste t no Excel ..... 102
Figura 58:Passo 5 para realizar teste t no Excel ..... 102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Dados climatológicos para Rondonópolis.....23
Tabela 2: Padrões para $NO_2$ e $O_3$. .....36
Tabela 3:Índice de qualidade do ar para $NO_2$ e $O_3$.....37
Tabela 4:Qualidade do ar e efeitos à saúde.....37
Tabela 5:Cores complementares. .....41
Tabela 6:Datas das amostragens.....60
Tabela 7:Dados para curva de calibração para $NO_2$ com Global Analyser. .....69
Tabela 8:Dados para curva de calibração para $NO_2$ com "homemade". .....69
Tabela 9:Teste - t curva $NO_2$ Analyser x homemade. .....71
Tabela 10:Dados para curva de ozônio medido com espectrofotômetro Analyser....72
Tabela 11:Dados para curva de ozônio medido com fotômetro “homemade”. .....73
Tabela 12:Teste-t curva ozônio Analyser x homemade. .....74
Tabela 13:Resultados de teste t-Student para $NO_2$ para o dia 05/05/2022.....77
Tabela 14:Teste t-Student espectrofotômetro Analyser e Fotômetro "Homemade". .78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COV. Compostos orgânicos voláteis

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente

COVID-19. Coronavirus disease 2019

DETRAN MT. Departamento Estadual de Trânsito do Mato Grosso

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estátistica

LCD.Display de cristal líquido

LED. Diodo emissor de luz

LS. Latitudes Subtropicais

NOx. Óxidos de nitrogênio

OECD. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OMS. Organização Mundial de Saúde

OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde

UV. Radiação solar ultravioleta

UV-Vis. Radiação ultravioleta e visível

V/V. Volume/volume

**SUMÁRIO**

1 INTRODUÇÃO .....20
1.1 Rondonópolis .....20
1.1.1 O clima em Rondonópolis .....22
1.2 Atmosfera terrestre.....23
1.2.1 Formação ozônio e $NO_2$ na troposfera.....25
1.2.2 Smog fotoquímico .....30
1.2.3 Fenômenos meteorológicos e poluição atmosférica .....31
1.3 Prejuízos causados por poluição atmosférica .....32
1.3.1 Prejuízos por problemas de saúde.....33
1.3.2 Prejuízos na agricultura.....34
1.3.2.1 Mecanismo de ação do ozônio nas plantas.....34
1.3.3 Ação do ozônio nos materiais .....35
1.4 Padrões de qualidade do Ar no Brasil .....36
1.4.1 Padrões de $NO_2$ e ozônio na Resolução CONAMA 491/2018 .....36
1.5 Amostragem de gases .....37
1.5.1 Amostragem ativa .....38
1.5.2 Amostragem passiva.....38
1.5.2.1 Uso da primeira Lei de Fick na amostragem passiva.....39
1 .6 A lei de Beer-Lambert e a colorimetria na medição de concentrações .....40
1.7 Fotômetros de baixo custo .....42
1.8 Importância da estatística na análise de dados experimentais .....43
1.8.1 Teste estatístico t- Student.....43
2 OBJETIVO.....44
2.1 Objetivo Geral: .....44
2.2 Objetivos específicos/metodologia.....44
3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....45

3.1 Construção do amostrador passivo ..... 45
3.2 Reagentes e soluções utilizados ..... 45
3.2.1 Solução de trietanolamina 11% V/V ..... 46
3.2.2 Reagente de Griess-Saltzman ..... 46
3.2.3 Solução de índigo trissulfonado de potássio ..... 46
3.2.4 Extração do analito $NO_2$ do filtro de celulose ..... 47
3.2.5 Reação do $NO_2$ com o regente de Griess-Saltzman ..... 47
3.2.6 Ressolubilização do índigo do filtro ..... 48
3.2.7 Preparo do padrão para $NO_2$ em nitrito equivalente ..... 48
3.3 Curvas de calibração para $NO_2$ ..... 49
3.3.1 Espectrofotômetro Global Analyser ..... 49
3.3.2 Fotômetro “homemade” ..... 49
3.4 Curvas de calibração para ozônio ..... 50
3.4.1 Espectrofotômetro Global Analyser ..... 50
3.4.2 Fotômetro “homemade” ..... 50
3.5 Características do fotômetro “homemade” ..... 51
3.5.1 Peças utilizadas no fotômetro “homemade” ..... 51
3.5.1.1 Sensor de luminosidade TSL2561 ..... 51
3.5.1.2 Placa Arduino UNO ..... 52
3.5.1.3 Display LCD e módulo serial ..... 53
3.5.1.4 Potenciômetro ..... 54
3.5.1.5 Lâmpada de LED ..... 54
3.5.1.6 Resistor ..... 54
3.5.1.7 Fonte de alimentação ..... 55
3.5.2 Código de programação do fotômetro “homemade” ..... 55
3.5.3 Esquema de ligação do fotômetro “homemade” ..... 57
3.5.4 Esquema de ligação dos componentes no porta cubeta ..... 58

3.5.5 Caixa para acondicionar o fotômetro “homemade” .....58
3.6 Locais e datas de instalação dos amostradores em Rondonópolis.....59
3.6.1 Critérios para escolha dos locais de instalação dos amostradores .....61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....68
4.1 Parâmetros usados para validação da curva analítica .....68
4.1.1 Linearidade e desvio padrão da curva analítica para $NO_2$ .....68
4.1.2 Teste t-Student para curvas de $NO_2$ Analyser x homemade .....71
4.1.3 Desvio padrão coeficiente angular e linear da curva analítica para $NO_2$.....71
4.1.4 Limite de detecção (LD) para $NO_2$.....71
4.1.5 Limite de quantificação (LQ) para $NO_2$.....72
4.1.6 Linearidade e Desvio padrão da curva analítica para ozônio .....72
4.1.7 Teste t-Student para curvas de ozônio Analyser x homemade .....74
4.1.8 Desvio padrão coeficiente angular e linear da curva analítica ozônio .....75
4.1.9 Limite de detecção (LD) para ozônio.....75
4.1.10 Limite de quantificação (LQ) para ozônio .....75
4.1.11 Teste t-Student para amostras de campo .....75
4.2 Considerações sobre o fotômetro “homemade” .....78
4.3 $NO_2$ e ozônio na resolução CONAMA 491/2018 .....79
4.4 Concentrações de $NO_2$ em Rondonópolis intervalos de 24 horas.....79
4.5 Concentrações de ozônio em Rondonópolis intervalos de 24 horas.....80
4.5.1 Provável causa do aumento de ozônio em Rondonópolis.....80
4.5.2 Região de maior concentração de ozônio em Rondonópolis .....82
4.5.3 Comparando médias de concentração em intervalos de 8 e 24 horas.....86
4.5.4 Período do dia e a concentração de $NO_2$ ozônio em Rondonópolis.....87
4.5.5 Influência da radiação solar e da temperatura nas concentrações de ozônio em Rondonópolis .....89
4.6 Importância do Arduino para democratização de tecnologias inovadoras .....92

5 Conclusões.....93

6 POSSIBILIDADE FUTURA DE TRABALHO: .....94

7 REFERÊNCIAS.....95

8 Anexos .....101

Anexo 8.1  Passos para realização do teste t-Student no Microsoft Excel.....101

Anexo 8.2 Planilhas com dados de teste t-Student realizado.....103

Anexo 8. 3 Código fonte gerado com GPT chat para o fotômetro “homemade”.....120

# 1 INTRODUÇÃO

O ar puro é um requisito básico para a saúde e o bem-estar humano. No entanto, em muitos países ao redor do mundo, a poluição do ar é um grave problema, pois ameaça tanto a saúde humana quanto o meio ambiente. Entre os poluentes atmosférico, destacamos o dióxido de nitrogênio ($NO_2$) e ozônio ($O_3$). O $NO_2$ porque está envolvido na formação do ozônio ($O_3$) que é um forte agente oxidante responsável por prejuízos a saúde das pessoas, diminuição da produtividade agrícola e danos a diversos tipos de materiais.

O desenvolvimento dos experimentos deste projeto foi realizado com amostradores passivos para coleta de $NO_2$ e ozônio em seis localidades do perímetro urbano da cidade de Rondonópolis a cada 15 dias durante aproximadamente um ano. Rondonópolis está em uma região tropical onde existe a presença dos biomas Cerrado, Pantanal e Amazônia, nestas regiões é frequente a ocorrência de grande quantidade de queimadas e a queima de biomassa contribui para a geração de $NO_2$ e ozônio.

A quantificação do $NO_2$ e ozônio ocorreu por a colorimetria, onde foi utilizado dois equipamentos um espectrofotômetro comercial e um fotômetro construído com materiais alternativos.

## 1.1 Rondonópolis

A cidade de Rondonópolis está no Centro Oeste do Brasil, no sudeste do estado de Mato Grosso. É uma cidade em expansão econômica e demográfica. Entre os anos de 2010 e 2021 houve aumento de 18,42% da população do município, mas o número de veículos aumentou em 46,91% conforme mostra Figura 1.

O forte da economia local é o agronegócio, sendo a soja uma cultura muito importante na região, o município também conta com grandes fábricas de produção de óleo de soja e derivados. Em 2013 foi inaugurado a Ferronorte para ligar Rondonópolis ao porto de Santos no estado de São Paulo, o evento da chegada do terminal ferroviário contribuiu significativamente para a ampliação das atividades econômicas da região, aumento da população e consequente ampliação da frota de veículos da cidade.

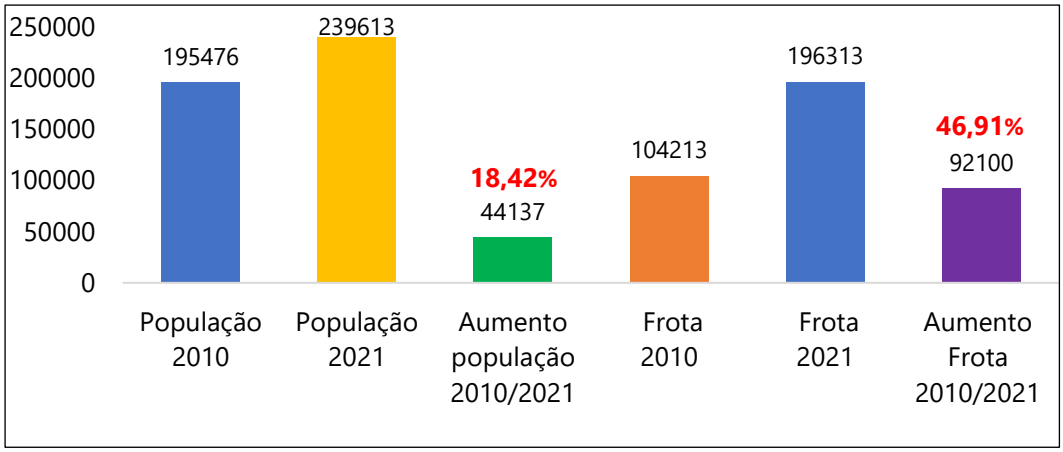


Figura 1:Dados população frota veículos Rondonópolis 2010/2021
Fonte: IBGE; DETRAN MT.

Leandro e Angeoletto (2017, p.124) afirmam que “as principais fontes de emissão de poluentes que ocorrem no município de Rondonópolis são as fontes móveis, (ou seja, sua frota de veículos), e as fontes fixas (isto é, emissões de poluentes a partir de parques industriais)”. A afirmação não foi fundamentada em dados experimentais locais, já que não existem dados locais de poluentes atmosféricos. Mas também na mesma linha de raciocínio podemos inferir que devido a incêndios na vegetação, principalmente no período de escassez de chuvas na região, também deve existir poluição atmosférica proveniente destas fontes.

O aumento da frota de veículos com motor a combustão promove aumento da concentração de gases como $NO_2$ e ozônio troposférico nas cidades, então tem se a necessidade de buscar ampliar o conhecimento sobre a qualidade do ar atmosférico de Rondonópolis. É fundamental conhecer áreas mais poluídas dentro do perímetro urbano, não só para informar a população, mas principalmente para ajudar a direcionar a construção de políticas públicas atuais e futuras referente ao desenvolvimento sustentável do município.

Saber sobre a qualidade do ar é muito relevante, pois a poluição atmosférica está ligada não só a muitos problemas de saúde coletiva, mas também a prejuízos econômicos para a sociedade. Os poluentes principalmente o ozônio são determinantes para deterioração de materiais como borrachas, tintas e tecidos sintéticos e diminuição da produtividade agrícola como resultado da alta reatividade e fitotoxidade do ozônio. Os danos podem atingir diversas atividades agrícolas incluindo a soja e o milho que são duas culturas muito presentes na região de Rondonópolis.

Nos estudos de quantificação de dióxido de nitrogênio e ozônio, a técnica frequentemente mencionada na literatura é a colorimetria, devido ao seu menor custo, aliado a robustez e ótima precisão dos resultados de análise. Nesta técnica os analitos passam por reações químicas que provocam alteração de cor da solução resultante. A variação de cor é proporcional a concentração dos analitos e está variação pode ser medida por espectrofotômetro ou fotômetro. Devido a avanços na computação e barateamento de componentes eletrônicos é possível a construção de equipamentos que fazem medidas similares a espectrofotômetro a um custo muito baixo.

No início do ano 2021 quando se começou a formular este projeto de pesquisa o mundo enfrentava um período crítico da pandemia de COVID-19 e como medida de combate ao vírus havia restrição de contato entre as pessoas, então existia impossibilidade de acesso a laboratórios com aparelhos para realizar a colorimetria das nossas amostras. A alternativa para viabilizar as análises foi a construção de um fotômetro “homemade” de baixo custo, existem vários trabalhos na literatura relatando a construção destes equipamentos embora o uso seja para outras finalidades.

Para o desenvolvimento dos experimentos foi escolhido Rondonópolis, não apenas para facilitar a aplicação dos experimentos durante o período de restrições da COVID-19 tendo em vista que está é a cidade de residência do autor deste projeto, mas principalmente porque é uma cidade de porte médio com presença de indústrias e um polo de distribuição e produção de produtos agrícolas e está localizada em uma região onde ocorrem fortes queimadas de biomassa o que pode influenciar na qualidade do ar da cidade.

### 1.1.1 O clima em Rondonópolis

De acordo com Sette (2005, p.33) Rondonópolis está em uma região localizada na porção central do continente sul-americano com características específicas dos climas Continentais das latitudes intertropicais da América do Sul que é uma área de transição entre os climas Tropicais Continentais do Cerrado e os climas Equatoriais Continentais da Floresta Amazônica.

Em Rondonópolis existe estação úmida e estação seca, a estação seca inicia-se em abril e vai até setembro, mas a partir de agosto as precipitações vão aumentando até setembro indo em direção ao início da estação úmida em outubro,

estas características podem ser percebidas analisando os dados climatológicos apresentados na Tabela 1.

Sette (2005, p.33) explica que o motivo da alternância entre estação úmida e seca em Rondonópolis que é a sua localização continental na região Centro Oeste, distante entre 1.400 e 2.000 km do oceano Atlântico.

Nos meses de maio a setembro em Rondonópolis ocorre escassez de chuva, isso faz com que a vegetação na região esteja propicia a queimadas, então é comum principalmente em agosto e setembro a existência de muitos focos de queimadas.

Tabela 1:Dados climatológicos para Rondonópolis.

| | jan. | fev. | mar. | abr. | maio | jun. | jul | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura máxima (°C) | 30.5 | 30.6 | 30.6 | 30.8 | 30.1 | 30.3 | 30.6 | 33.1 | 34.5 | 33.3 | 31.2 | 30.7 |
| Chuva (mm) | 279 | 225 | 186 | 76 | 28 | 10 | 7 | 10 | 49 | 120 | 188 | 258 |
| Umidade (%) | 80 | 81 | 80 | 74 | 65 | 59 | 53 | 43 | 48 | 64 | 76 | 79 |
| Dias chuvosos (d) | 18 | 16 | 16 | 9 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 12 | 16 | 18 |
| Horas de sol (h) | 9.5 | 9.4 | 9.1 | 9.3 | 9.0 | 9.3 | 9.6 | 10.1 | 10.2 | 10.2 | 9.7 | 9.6 |

Fonte: Climate Data.

## 1.2 Atmosfera terrestre

Os organismos vivos existentes no planeta Terra estão integrados com os compartimentos atmosfera, água e solo. Esta interação já é estudada no que conhecemos como ciclos biogeoquímicos dos elementos. Outra forma de abordar o conceito interação organismos vivos e ambiente foi sugerido pelo autor James Lovelock na “Hipótese de Gaia”, embora a teoria seja polêmica, é provocativa e ajuda a pensar nas relações existentes entre organismos vivos e planeta. Nesta hipótese clima e composição química da Terra são mantidos em equilíbrio, e alterações em um provoca mudanças no outro. O resultado destas alterações pode ser mais bem compreendido analisando a simulação de Lovelock, no planeta nomeado de Mundo das Margaridas, nele existe somente margaridas pretas e brancas. No modelo proposto para explicar como a biota pode manter controlada a temperatura de uma superfície, as margaridas pretas, absorvem mais luz solar e aquecem mais rápido do que as margaridas brancas quando o sol está mais fraco, levando a aumento das margaridas pretas e escurecendo a superfície do planeta. Com a superfície mais escura, o planeta absorve mais radiação solar favorecendo o aquecimento da superfície. Posteriormente com o maior aquecimento do sol, as

margaridas brancas aumentam sua população, então, haverá mais flores brancas do que pretas e a superfície do planeta irá refletir mais energia solar e isso resultará no equilíbrio térmico da superfície, independente da intensidade da radiação emitida pelo sol (LOVELOCK, CRISPIN, KORYTOWSKI, p.34. 2006).

O exemplo das margaridas na “Hipótese de Gaia” contribui para o entendimento de como os seres podem interferir no clima do planeta, e que está interferência em algum momento pode levar a diminuição de espécies predominantes, para que outra espécie prospere. Conhecer o quanto a espécie humana vem alterando a atmosfera do planeta é um dos problemas mais latentes, pois as alterações podem inviabilizar a sobrevivência da espécie humana em Gaia, já que “[...]Gaia é um sistema evolutivo, e qualquer espécie inclusive a humana, que persista em mudanças do meio ambiente que reduzem a sobrevivência de sua prole está fadada a extinção” (LOVELOCK, CRISPIN, KORYTOWSKI, p.108. 2006).

Para Christopherson (2017, p. 60), “a atmosfera é uma reserva ímpar de gases de sustentação da vida, produto de 4,6 bilhões de anos de evolução. Alguns dos gases são componentes cruciais de processos biológicos [...]”, devido a sua composição o compartimento atmosférico pode ser comparado a um reator químico, que tem a luz solar como fonte de energia e é promotora de reações fotoquímicas que podem ser por compostos como o $NO_2$ (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p. 97).

A atmosfera terrestre pode ser dividida em diversas camadas horizontais, diferenciadas com base principalmente na temperatura. O comportamento das propriedades física e química da atmosfera é resultante dos gases que a formam, que podem ser de fontes naturais ou antrópicas. Os seus principais componentes em termos de quantidade são 78,1% de nitrogênio, 21% de oxigênio, 0,9% de Argônio e 0,04% de dióxido de carbono, ainda existem outros gases com concentração abaixo de 0,002%, (MANAHAN, 2013, p. 278).

A atmosfera terrestre é um ambiente oxidante, devido à alta concentração de $O_2$. Os gases lançados na atmosfera de origem natural ou não, são completamente oxidados na atmosfera e posteriormente depositados na superfície do planeta. Um tipo muito comum de poluição da atmosfera é o smog fotoquímico que está relacionado a produção de NO (óxido nítrico) e compostos orgânicos voláteis (COVs) que são chamados de poluentes primários por serem lançados diretamente na

atmosfera, onde podem ser convertidos em $O_3$ e $HNO_3$, que são espécies designadas poluentes secundários (BAIRD,2011, p.113,119).

Dependendo do local de formação do ozônio na atmosfera ele pode ter papéis opostos, o ozônio que se forma na estratosfera, entre 12 e 40 Km de altitude, constitui um importante filtro de proteção contra radiação solar ultravioleta (UV). Na estratosfera, as moléculas de $O_2$ e $N_2$ filtram a radiação solar e apenas uma pequena fração de energia com comprimento de onda ($\lambda$) menor que 220 nm atinge a superfície da Terra. Já a radiação UV na faixa de 220 a 320 nm é filtrada principalmente pelas moléculas do oxigênio tri atômico, $O_3$, (MOZETO,2001, p. 46) na chamada camada de ozônio. Quando o ozônio se forma na troposfera próximo a crosta terrestre ele passa a ser um sério problema a vida, pois tem efeito maléfico para a saúde das pessoas, é fitotóxico e prejudica diversos tipos de materiais.

### 1.2.1 Formação ozônio e $NO_2$ na troposfera

A formação do ozônio e do $NO_2$ na troposfera está relacionado principalmente a veículos com motor a combustão, indústrias que queimam combustível e queima de biomassa. Inicialmente ocorre a formação e emissão de NO, que posteriormente na atmosfera é oxidado a $NO_2$. O ozônio é formado quando a luz solar decompõe $NO_2$ a NO e O● e este último reage com o $O_2$ formando o $O_3$ (CHRISTOPHERSON,2017, p.71). Baird (2011, p. 121) esclarece que a combustão da madeira e outros materiais naturais em ambientes abertos e fechados também produz NO, mas em menor quantidade devido a menor temperatura da chama neste tipo de combustão. O NO e o $NO_2$ são gases encontrados próximos à área da combustão, e isso não depende do tipo de material queimado (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p. 106).

Existem modelos matemáticos que ajudam na previsão da formação de ozônio em uma região. Um estudo de simulação mostrou que existe dependência não linear das concentrações de ozônio com as variações nas concentrações de COVs e NOx. A diminuição nas concentrações de COVs (a NOx constante) pode ser efetiva na diminuição das concentrações de $O_3$, enquanto a diminuição das concentrações de NOx (a COVs constante) não necessariamente leva a uma diminuição das concentrações máximas de $O_3$ (SILVA *et al.*, 2019, p. 280, 281).

Devido a diversidade de substâncias presentes na atmosfera ocorrem complexa interação entre elas, resultando novas espécies químicas. A capacidade

oxidante da atmosfera promove a formação de espécies oxidantes como $O_3$, $H_2O_2$, OH, $HO_2$, $NO_3$ e nitrato de peroxiacetila (PAN) elas merecem especial atenção, porque modificam a composição química da atmosfera e interferem na qualidade do ar. Os processos de oxidação agem na limpeza da atmosfera porque o processo de oxidação produz sempre moléculas mais solúveis em água facilitando sua remoção pela chuva (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p. 97,108, 109).

A reação para a formação do oxido nítrico (equação 1), praticamente não ocorre em condições normais de temperatura pois os gases oxigênio e nitrogênio são bastante estáveis e não reagem entre si, mesmo estando juntos na atmosfera terrestre em altas proporções nitrogênio 78,1% e oxigênio 21,0%.

$$\mathbf{N_2 + O_2 \rightarrow 2NO} \quad \text{(equação 1)}$$

A estabilidade entre oxigênio e nitrogênio na atmosfera terrestre, em condições normais, é explicada pelo fato de que, na reação de produção do NO a 25 °C, no equilíbrio químico resulta em uma quantidade de NO cuja pressão parcial é de apenas 2,9 $10^{-14}$ KPa. Porém, em temperaturas que usualmente ocorrem em processos de combustão, como a temperatura de 1727 °C, essa pressão aumenta para 0,23 KPa (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p. 106,107). Nessa temperatura, a reação entre $O_2$ e $N_2$, passa a produzir quantidade significativa de NO.

Spiro e William (2009, p.130,131) explicam que a alta temperatura necessária para a formação do NO, está relacionada ao alto valor de energia de ativação necessária para iniciar a reação entre os gases oxigênio e nitrogênio, e pelo fato de ser um processo endotérmico.

Óxidos de nitrogênio (NOx) também podem ser gerados em pequenas concentrações por relâmpagos devido a altas temperaturas geradas na atmosfera pelo raio. Fontes biológicas, também podem, foi descoberto que árvores coníferas também emitem NOx. A combustão de materiais combustíveis que apresentam nitrogênio na sua composição como a biomassa também é fonte de NOx, neste processo, o NO é produzido pela oxidação de átomos de nitrogênio contidos na composição do combustível. Este é conhecido como NO combustível que o diferencia do NO térmico gerado pelo calor da combustão (BAIRD, 2011, p.121,122), claro que

ambos são indistinguíveis quimicamente, a diferença é apenas do processo de geração.

Presbiteris (2021, p. 85) lembra que “embora o monóxido de nitrogênio não seja tóxico, os produtos de sua reação com outros compostos da atmosfera podem trazer consequências graves se estiverem em alta concentração”.

Spiro e William (2009, p. 160) relatam que formação do ozônio com origem no oxigênio (equação 4) requer energia, na estratosfera a energia é proveniente da radiação UV, mas ao nível do solo como existe baixa quantidade de UV, o ingrediente essencial para formação do ozônio é o $NO_2$ que tem absorção máxima em 400 nm, (equação 3) ou seja, absorve luz visível, e o $NO_2$ quando excitado é instável e se dissocia em NO e O, oxigênio atômico rapidamente reage com $O_2$ originando ozônio, conforme descrito nas equações 3 e 4.

A oxidação do NO na atmosfera se dá principalmente com a reação do ozônio:

$$\mathbf{NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2} \qquad \text{(equação 2)}$$

O gás $NO_2$ formado nessa etapa, na presença de luz solar sofre reação oposta provocando a dissociação do $NO_2$ e regenerando NO e gerando o oxigênio radical O● que reagem com o oxigênio do ar formando o ozônio:

$$\mathbf{NO_2 + h\nu\ (\lambda \leq 400\ nm)} \rightarrow \mathbf{NO} + \mathrm{O}\bullet \qquad \text{(equação 3)}$$

$$\mathrm{O}\bullet + \mathbf{O_2 \rightarrow O_3} \qquad \text{(equação 4)}$$

Parte do $O_3$ formado na atmosfera (equação 4) sofre fotólise e pode reagir com o vapor d’água presente na atmosfera, gerando radicais hidroxila (equações 5 e 6) (FINLAYSON et al, 1986; CHAN et al, apud LIMA, FELIX, CARDOSO 2021 p. 1152).

$$\mathbf{O_3 + h\nu\ (\lambda \leq 320\ nm) \rightarrow O\bullet + O_2} \qquad \text{(equação 5)}$$

$$\mathbf{O\bullet + H_2O \rightarrow 2\ HO\bullet} \qquad \text{(equação 6)}$$

Os radicais HO• formados (equação 6) atuam na oxidação dos COVs, fato que interfere no equilíbrio que resulta na conversão do NO a $NO_2$ (equações 7,8,9).

Como resultado ocorre o aumento na concentração de $O_3$ na atmosfera pois mais $NO_2$ é formado e como descrito nas equações 3 e 4 o $NO_2$ atua na formação de $O_3$.

$$\mathbf{RH + HO\bullet \rightarrow H_2O + R\bullet} \qquad \text{(equação 7)}$$

$$\mathbf{R\bullet + O_2 \rightarrow RO_2\bullet} \qquad \text{(equação 8)}$$

$$\mathbf{RO_2\bullet + NO \rightarrow NO_2 + RO\bullet} \qquad \text{(equação 9)}$$

O NO pode ser preferencialmente oxidado pelo ozônio (equação 2) e essa reação é importante para o consumo do ozônio na atmosfera formado nos processos descritos nas equações 3 e 4. Nesta etapa existem taxas iguais de formação e destruição de $O_3$ e $NO_2$, as reações estão em um estado de equilíbrio chamado fotoestacionário, e os níveis de ozônio tendem a permanecer baixos (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009, p. 107). O estado fotoestacionário é quebrado quando a composição da atmosfera é alterada principalmente por atividades antrópicas que produzem NO, $NO_2$, e compostos orgânicos voláteis (COVs).

Os COVS são emitidos pela maioria dos solventes, lubrificantes e combustíveis quando eles são manipulados, mas podem ser lançados na atmosfera por indústrias químicas e petroquímicas e por veículos automotores. Os COVs podem ser vaporizados mesmo em temperatura e pressão ambientes e normalmente seus pesos moleculares são menores que 200 g/mol. A quantidade de COVs diferentes é grande, existem mais de 600 compostos químicos voláteis utilizados pelo homem (SCHIRMER; LISBOA,2009, p. 42).

Outra fonte importante de COVs é a vegetação, toda ela emite algum tipo de composto orgânico. Alguns tipos de árvores emitem diferentes COVs para atmosfera, na forma de hidrocarbonetos reativos, são suficientes para produzir ozônio e causar smog fotoquímico, mesmo em regiões livres de poluição antropogênica. Este é o caso de árvores coníferas que emitem principalmente gás isopreno, pineno e limoneno (BAIRD; 2011, p.130,131).

Os COVs (RH) conforme equação 7, entram na cadeia de oxidação pela reação com $HO^{\bullet}$, que são iniciadores de reações que posteriormente resultam na formação do $O_3$. Os radicais orgânicos formados ($R^{\bullet}$) geram radicais peróxi ($RO_2^{\bullet}$ e $HO_2^{\bullet}$), responsáveis pela oxidação do NO a $NO_2$. Concentrações altas de COVs resultam na maior produção de $O_3$ na troposfera, pois os radicais peróxi formados

oxidam o NO, aumentando a concentração da molécula precursora de $O_3$ na troposfera ($NO_2$) e minimizando a principal via de eliminação do ozônio formado (equação 3), que envolve a conversão do NO a $NO_2$.

As reações que consomem os COVs possuem um papel importante na “limpeza” da atmosfera. O aumento do ozônio na troposfera é consequência dessas reações e produto da emissão indiscriminada de COV e NO por atividades antrópicas (WAYNE,2000 apud LIMA, FELIX, e CARDOSO 2021 p. 1152).

Baird (2011, p. 125) concorda com Rocha, Rosa e Cardoso (2009 p. 108) que mesmo regiões com pouca atividade antrópica, emissões naturais podem gerar ozônio com concentrações de cerca de 30-40 ppb.

Normalmente a presença de poluentes está relacionada a grandes áreas urbanas e com indústrias, mas Passaretti Filho (2015, p. 79) relata sobre a existência de $NO_2$ e outros poluentes em cidades com pouca atividade industrial, cujas concentrações são tão altas ou maiores que as observadas em regiões industriais, devido a presença do cultivo de cana de açúcar, o aumento de $NO_2$ está relacionado a queima de biomassa e a utilização de veículos no processo.

A poluição também pode afetar áreas distantes de onde foram emitidas. As massas de ar podem transportar os poluentes atmosféricos por 1.000 Km ou mais, então a poluição do ar deve ser pensada a nível regional e não somente local.

As condições meteorológicas de verão com longos períodos de insolação favorecem as reações fotoquímicas e, portanto, a formação de maiores quantidade de ozônio nas áreas urbanas (BAIRD, 2011, p. 126).

As reações apresentadas nas equações 1 a 9 são reações gerais e simplificadas. Muitos autores têm proposto mecanismos para explicar os processos químicos que acontecem na atmosfera para formar ozônio. O mecanismo completo é complexo e envolve centenas de reações complexas e não lineares com poluentes primários, especialmente COVs e NOx. Um outro modelo simplificado proposto para formação de ozônio os COVs reagem com radicais hidroxila (•OH), ozônio e radicais $NO_3$, formando outros radicais. Na presença de luz a principal via de reação é com os radicais •OH, para os compostos com dupla ligação a via de ozonólise poderá ocorrer. Nestas reações os radicais alquila (•R) e peroxialquila (•$RO_2$) são formados, e com o $O_2$ e NO formam o $NO_2$, e este se decompõe fotoquimicamente, formando oxigênio atômico que na presença de $O_2$ origina ozônio (SILVA; ARBILLA,2018, p. 1900).

### 1.2.2 Smog fotoquímico

A intensificação dos processos discutidos anteriormente levam a formação de um fenômeno conhecido como smog fotoquímico.

"Smog" fotoquímico se refere a concentração de ozônio na troposfera, originado através de reações químicas entre diferentes poluentes emitidos antropicamente. A palavra "smog" é a junção das palavras inglesas "smoke" (fumaça) mais "fog" (neblina), a formação do smog fotoquímico também depende da presença de luz solar (SCHIRMER; LISBOA,2009, p. 41).

O smog é formado em áreas urbanas densamente povoadas onde normalmente ocorre o lançamento de grande quantidade de poluentes como NO, hidrocarbonetos reativos e outros COVs no ar, essas emissões aliadas a alta insolação, temperaturas elevadas e pouco movimento das massas de ar podem favorecer a formação do smog fotoquímico (BAIRD, 2011, p. 119).

Um mecanismo para formação do smog fotoquímico é ilustrado na Figura 2, cujos ingredientes principais são o NO proveniente principalmente de veículos, luz solar e RH que representam compostos orgânicos voláteis.

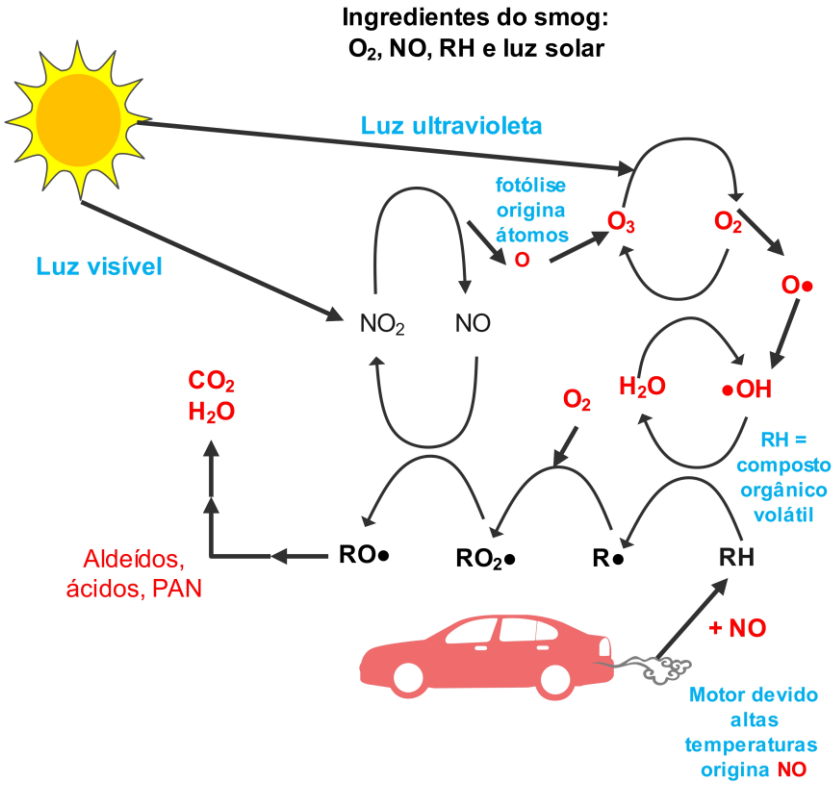


Figura 2:Mecanismo de formação do smog.
Fonte: Autor (Adaptado de SPIRO; WILLIAM 2009, p.161).

Uma característica observada na atmosfera na qual ocorre o smog fotoquímico é a coloração marrom avermelhada e seu pico ocorre por volta das 10 h ou 12 h (BRAGA *et al.*, 2005, p. 181).

As concentrações dos gases responsáveis pelo smog fotoquímico também variam conforme o período do dia, o pico de $NO_2$ é alcançado por volta das 8 horas da manhã em virtude do aumento de emissão de NO devido ao aumento da movimentação de veículos levando as pessoas para o trabalho. O gás NO emitido é oxidado pelo ozônio presente na atmosfera e forma o $NO_2$ e diminui a concentração local de ozônio. Posteriormente com o aumento da luz solar e a presença de COVs na atmosfera, a formação do ozônio é intensificada, e o pico nas concentrações de ozônio ocorre por volta das 12:00 horas (BAIRD, 2011, p. 123-124).

### 1.2.3 Fenômenos meteorológicos e poluição atmosférica

A poluição do ar envolve três etapas, emissão, dispersão e recepção do poluente, a dispersão do poluente e consequentemente sua recepção são influenciadas por eventos meteorológicos. Davidson; Tirabassi e Moraes (2008, p. 12) consideram que “A meteorologia tem um papel fundamental em relação à qualidade do ar. Na verdade são os eventos meteorológicos que guiam a dispersão de poluentes e a sua deposição no solo, uma vez que estão imersos na atmosfera.”

Segundo Derisio (2012, p. 125) os principais elementos meteorológicos que influenciam os episódios de poluição atmosférica são vento, turbulência, temperatura, pressão, umidade relativa, radiação e precipitação.

A temperatura e a densidade do ar na troposfera diminuem com o aumento da altitude. O ar quente proveniente de uma chaminé ou escapamento de carro apresenta uma densidade baixa como resultado do calor que afasta as moléculas dos gases. Os gases das chaminés tendem a subir na coluna de ar da troposfera até encontrar uma camada de densidade similar. Variações em algumas das condições meteorológicas mencionadas acima podem provocar um fenômeno chamado inversão térmica, ele é muito importante para a formação de poluição atmosférica.

As inversões térmicas são fenômenos naturais que ocorrem principalmente no inverno, a superfície da terra tende a esfriar rapidamente já que não consegue reter o calor e desta forma perde o calor para a atmosfera. Então as camadas inferiores da atmosfera ficam com temperaturas menores do que camadas superiores, resultando na inversão de temperatura da camada de ar. Isso resulta em

um ar mais denso junto ao solo e uma camada de ar menos denso logo acima e a fumaça das chaminés e escapamentos não conseguem ultrapassar a camada de ar quente menos densa da troposfera. Com isto cria-se como uma condição similar a uma redoma sobre uma cidade o que favorece o aumento da concentração dos poluentes (SILVA,2011, p. 85).

A inversão térmica impedi a dispersão dos poluentes já que a camada fria fica em baixa altitude, e a concentração de poluentes junto ao solo aumenta. As inversões geralmente se formam de madrugada, e são destruídas de manhã com aquecimento provocado pelo sol (DERISIO,2012, p. 124).

Outro fator importante que afeta a concentração dos poluentes na troposfera é a capacidade da camada de ar que deve misturar com os gases poluentes para formar uma solução gasosa. Esta capacidade de mistura não se estende por toda a troposfera. Existe uma região que ocorre a mistura entre os gases poluentes e o ar que é favorecida por turbulências. Essa região interage diretamente com a superfície terrestre e é designada de camada limite atmosférica, essa mistura ocorre normalmente durante o dia a uma altitude de 1-2 quilômetros. A concentração dos poluentes, razão entre massa/volume, depende não só da emissão (massa) mas da altura da camada limite (volume). O volume de ar da camada de mistura depende da temperatura local. Durante o dia, a maior temperatura, favorece a expansão da camada de mistura e a noite, por outro lado, favorece a diminuição da camada de mistura. Este fato é importante pois ajuda a explicar por que durante a noite mesmo com a menor emissão (massa) a concentração de todos os poluentes tende a aumentar pela diminuição do volume da camada de mistura. No caso de o poluente não sofrer degradação na camada de mistura ele poderá ser levado pelo vento para regiões distantes (WALLACE; HOBBS, 2006, p. 160,391).

### 1.3 Prejuízos causados por poluição atmosférica

A poluição do ar é extremamente onerosa, mas principalmente para os habitantes de áreas urbanas industrializadas, determinar os custos não é uma tarefa simples, então são realizadas estimativas, por exemplo em Pittsburg nos Estados Unidos o custo anual foi 20 dólares por habitante, mas há estimativas realizadas nos Estados Unidos de valores variando entre 10 e 60 dólares por habitante/ano. Então a prevenção a poluição do ar é vantajosa economicamente para a sociedade avaliando

o custo-benefício, para cada dólar gasto no controle da poluição do ar, economiza-se 16 dólares (DERISIO,2012, p. 119).

### 1.3.1 Prejuízos por problemas de saúde

A poluição atmosférica é segundo a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS,2021) uma das maiores ameaças ambientais à saúde humana, juntamente com a mudança do clima, pois:

> A cada ano, estima-se que a exposição à poluição do ar cause 7 milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vida saudáveis. Em crianças, isso pode incluir redução do crescimento e função pulmonar, infecções respiratórias e agravamento da asma. Em adultos, a cardiopatia isquêmica e o acidente vascular cerebral são as causas mais comuns de morte prematura atribuíveis à poluição atmosférica, e estão surgindo evidências de outros efeitos, como diabetes e doenças neurodegenerativas. Isso coloca a carga de doenças atribuíveis à poluição do ar no mesmo nível de outros grandes riscos globais à saúde, como dieta inadequada e tabagismo (OPAS,2021).

O $NO_2$ e o ozônio fazem parte dos poluentes atmosféricos que segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS,2021) estão atualmente relacionados aos maiores riscos ambientais para a saúde humana. A redução dos níveis de concentração destes poluentes significa reduzir os casos de acidente vascular cerebral, doenças cardíacas, câncer de pulmão e doenças respiratórias crônicas e agudas, incluindo asma. Recentemente a OMS atualizou os padrões de qualidade do ar depois de 15 anos, os padrões que eram considerados seguros agora não são, eles ficaram mais restritivos (OMS,2021). Esse fato implica no aumento da pressão para o combate à poluição do ar mundialmente. Muitos países que fazem parte do grupo mais desenvolvido economicamente e socialmente também apontam para uma política de diminuição e controle dos gases poluentes através de legislação rígida. Os países economicamente mais desenvolvidos foram historicamente os maiores geradores de poluição e esta visão de um “ar mais limpo” pode apontar uma tendência global e pressionar os países menos desenvolvidos a seguir na mesma direção. Recentemente grandes montadoras de veículos automotores anunciaram investimentos em pesquisas para a médio prazo pararem de produzir veículos com motores a combustão substituindo-os por motores elétricos, isso representa um

grande avanço para diminuir a poluição do ar, pois os motores a combustão dos automóveis são grandes responsáveis pela produção dos poluentes $NO_2$ e $O_3$.

O aumento das concentrações de ozônio está relacionado ao aumento de gastos com a saúde, prejuízos à arborização urbana, danos aos monumentos, edificações e redução da produtividade agrícola por isso sua geração deve ser restringida.

### 1.3.2 Prejuízos na agricultura

O aumento do ozônio poderá resultar em impacto negativo para o agronegócio global. Segundo a OECD (2016), o aumento de ozônio na atmosfera vai provocar redução da produtividade do trabalho, aumento de gastos com saúde, perdas de rendimento das colheitas, os prejuízos econômicos globais anuais tendem a aumentar de 0,3% em 2015 para 1,0% do produto interno bruto global até 2060. Outro estudo sobre perdas de produção agrícola devido a fitotoxidade do ozônio no mundo sugerem prejuízos de 17 a 35 bilhões de dólares por ano até 2030. Os países desenvolvidos podem ter pequenas perdas na produção, mas os países em desenvolvimento terão prejuízos maiores na agricultura devido ao aumento de poluição por ozônio (AVNERY *et al*., 2011).

Dados da literatura mencionam grandes prejuízos agrícolas provocados por exposição ao ozônio, por exemplo para a soja, exposição de 55 a 100 ppb de ozônio podem levar a perdas de 15% a 62% na produtividade, já para o milho a exposição a 150 ppb de ozônio pode levar a diminuição de até 40% da produtividade (LIMA; CABRAL; GONZALES MIGUEZ, 2001, p.145,155). Estudos de Bulbovas *et al* (2007), também relatam prejuízos para a cultura de soja em decorrência da exposição a 30 ppb de ozônio, a soja é uma cultura muito sensível ao ozônio e com grande importância econômica para o Brasil e o mundo porque é fonte importante de proteína na alimentação.

#### 1.3.2.1 Mecanismo de ação do ozônio nas plantas

O ozônio é um dos poluentes atmosféricos que podem causar danos a plantas. A ação dos poluentes nas plantas pode ocorrer através da redução da capacidade de fotossíntese, deposição de poluentes no solo ou penetração dos poluentes pelos estômatos, sendo que esta última é a forma mais conhecida. Os estômatos são poros nas folhas onde ocorre troca gasosa com o meio, quando poluentes gasosos entram

junto com o ar na planta pelos estômatos podem causar colapso do tecido foliar, clorose ou outras alterações da cor e no crescimento de plantas importantes para agricultura e para floricultura (DERISIO, 2012, p 125).

Nas plantas o ozônio inativa os estômatos, eles são inativados pela morte das células guarda, que controlam o seu processo de abertura e fechamento, levando também a um colapso do processo de captação de gases como o $CO_2$, necessário ao bom desempenho fotossintético das plantas, o ozônio também reage com a cera que recobre a superfície das folhas, a função da cera é ajudar a evitar perda de água e eletrólitos durante a transpiração, as mudanças na superfície da folha das plantas também interferem na incidência de luz (LIMA; CABRAL; GONZALES MIGUEZ, 2001, p.152,153). Por meio dos estômatos o ozônio entra no espaço intercelular, reage com a água formando espécies ativas de oxigênio, com alto potencial oxidativo (SAMUELSON, KELLY, 2001; FUHRER, BOOKER, 2003; BAIER *et al.* 2005 apud BULBOVAS *et al*,2008 p.360).

### 1.3.3 Ação do ozônio nos materiais

O ozônio é um gás fortemente reativo ele pode degradar muitos materiais, por exemplo a borracha tem forte afinidade com o ozônio, ele ataca a borracha natural e materiais semelhantes pela oxidação e quebra das ligações duplas, >C=C<, contidas na composição do polímero, este processo é representado na Figura 3 embora exista relatos na literatura de que ozonólise deste polímero resulta em produtos diferentes. Esse processo causa rachaduras e aparência de envelhecimento do material (MANAHAN, 2017, p. 337). As tintas e os tecidos sintéticos também podem ser degradados por processo semelhante ao da borracha o que pode resultar em mais prejuízos econômicos ou culturais quando atinge obras de arte em museus.

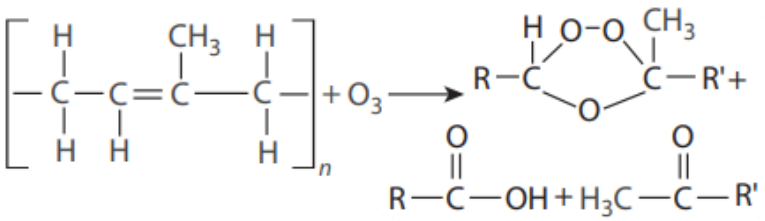


Figura 3:Ozonólise da borracha.
Fonte :MANAHAN (2017, p.337).

## 1.4 Padrões de qualidade do Ar no Brasil

Segundo Braga *et al.*, (2005, p. 189) os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela legislação brasileira, se aproximam das leis norte-americanas, o objetivo da legislação é estabelecer níveis máximos de concentração de diversos poluentes em função de um período médio. Atualmente os padrões de qualidade do Ar no Brasil são estabelecidos pela Resolução CONAMA 491/2018.

### 1.4.1 Padrões de $NO_2$ e ozônio na Resolução CONAMA 491/2018

A Resolução CONAMA 491/2018 no artigo 4º estabelece que os padrões de qualidade do ar serão adotados em quatro etapas, a primeira etapa entrou em vigor com a publicação da resolução, os padrões estabelecidos são os intermediários PI-1, PI-2, PI-3 e o final (PF), eles serão adotados, cada um, de forma subsequente.

Embora exista os padrões intermediários a resolução CONAMA 491/2018 "não estabelece períodos peremptórios entre os estágios intermediários (PI-1, PI-2 e PI-3) e a etapa final (PF), estimulando a inércia de qualquer tentativa de atingir os limites mais restritivos" (RAPOSO; ASSIS; NORTON, 2021, p. 15).

Segundo o anexo II da Resolução CONAMA 491/2018 os padrões para $NO_2$ e $O_3$ são:

Tabela 2: Padrões para $NO_2$ e $O_3$.

| **Poluente Atmosférico** | Período de Referência | PI-1 µg/m³ | PI-2 µg/m³ | PI-3 µg/m³ | PF µg/m³ |
|---|---|---|---|---|---|
| $NO_2$ | 1 hora² | 260 | 240 | 220 | 200 |
| | Anual¹ | 60 | 50 | 45 | 40 |
| $O_3$ | 8 horas³ | 140 | 130 | 120 | 100 |

1 - Média aritmética anual
2 - Média horária
3 - Máxima média móvel obtida no dia

Fonte: CONAMA 491/2018.

A resolução CONAMA 491/2018 também fixa o Índice de Qualidade do Ar (IQAR) que é um valor utilizado para fins de comunicação e informação à população, o índice relaciona as concentrações dos poluentes monitorados aos possíveis efeitos adversos à saúde.

Segundo a Cetesb, 2014 "O índice de qualidade do ar é uma ferramenta matemática desenvolvida para simplificar o processo de divulgação da qualidade do ar. Esse índice foi criado usando como base uma longa experiência desenvolvida nos EUA".

A primeira faixa para $NO_2$ e $O_3$ definida no anexo IV da resolução CONAMA 491/2018 é a seguinte:

Tabela 3:Índice de qualidade do ar para $NO_2$ e $O_3$.

| **Qualidade** | Índice | $O_3$ µg/m³ (média móvel de 8h) | $NO_2$ µg/m³ (média de 1h) |
|---|---|---|---|
| N1 - Boa | 0 – 40 | 0 -100 | 0 -200 |

Fonte: CONAMA 491/2018.

Embora a resolução Conama 491 seja de 2018 a Cetesb já realizava desde 2013 a classificação da qualidade do ar no estado de São Paulo utilizando índices de qualidade do ar.

Na Tabela 4 onde estão os índices utilizados pela Cetesb o N1 utilizado pela Cetesb é o mesmo definido pela resolução Conama 491.

Tabela 4:Qualidade do ar e efeitos à saúde.

| Qualidade | Índice | Significado |
|---|---|---|
| N1 - Boa | 0 - 40 | |
| N2 - Moderada | 41 - 80 | Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada. |
| N3 - Ruim | 81 - 120 | Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde. |
| N4 - Muito Ruim | 121 - 200 | Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idoso e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas). |
| N5 - Péssima | > 200 | Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestação de doenças respiratório e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis. |

Fonte:CETESB,2014.

### 1.5 Amostragem de gases

Uma das etapas fundamentais nos trabalhos que envolvem análise da concentração de gases no meio ambiente é amostragem. Ela precisa ser bem planejada e executada para garantir que as demais etapas não fiquem comprometidas. O tempo de amostragem é uma variável relevante porque a concentração obtida após a análise terminada representa a média das concentrações

ao longo do tempo de amostragem. A escolha do tipo de amostrador é muito relevante para a análise química, ele deve atender o objetivo buscado pelo problema analítico que está se estudando. Por exemplo o problema pode ser a determinação dos picos máximos do poluente em uma cidade durante o dia ou a concentração média do poluente durante o dia. A amostragem deve atender a busca da solução do problema ou o objetivo buscado na análise. No geral, para análise de gases os amostradores utilizados podem ser ativos ou passivos.

### 1.5.1 Amostragem ativa

Os amostradores ativos utilizam bomba de vácuo para forçar a passagem do ar contendo o analito de interesse pelo interior do amostrador. O analito pode ser fixado por um reagente (reação química) ou uma superfície reativa (interação física). A principal vantagem deste tipo de amostrador é que ele permite muitos arranjos analíticos e uma coleta maior do analito.

### 1.5.2 Amostragem passiva

Os amostradores passivos são instrumentos para fixar compostos gasosos ou vapores presentes na atmosfera sem utilização de mecanismos de aspiração forçada. A amostragem é governada por processos físicos que ocorrem a nível molecular, tais como difusão e permeação (BROWN, WRIGHT, 1994; BROWN, 1995, apud CRUZ, CAMPOS ,2002 p. 406). Eles apresentam a vantagem de baixo custo e possibilidade de uso em locais onde não há eletricidade disponível, mas o desempenho do amostrador passivo pode ser afetado por condições climáticas como temperatura, velocidade do vento e umidade, a instalação dos amostradores em um abrigo pode minimizar parte desses efeitos (PETRUCI *et al.,* 2022, p. 7).

Embora os amostradores passivos sejam instrumentos relativamente simples, portáteis e baratos de serem usados nas amostragens, o processo de preparação do amostrador passivo precisa ser executado com cautela para evitar perdas do analito ou contaminação (KRUPA; LEGGE, 2000, p. 38).

A amostragem passiva é governada pela primeira Lei de Fick. Os amostradores passivos normalmente são objetos cilíndricos de dimensões geométricas conhecidas, na figura 4 é possível observar o esquema de amostrador passivo onde existe uma abertura onde é fixado uma membrana semipermeável que

permite a entrada do ar contendo o analito de interesse. No seu interior é criada uma região onde o ar permanece em estado próximo ao estagnado e por onde ocorre a difusão do gás para a superfície de coleta do analito que é um filtro impregnado com um reagente. (SOUZA; FRANCISCO; CARDOSO ,2017, p. 1233).

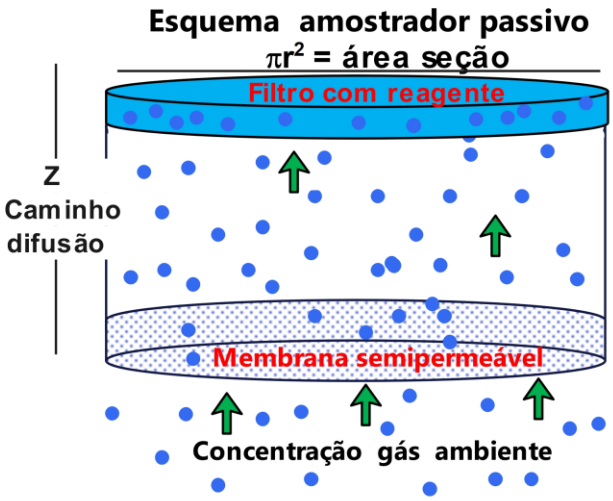


Figura 4:Esquema amostrador passivo.
Fonte: Autor.

### 1.5.2.1 Uso da primeira Lei de Fick na amostragem passiva

Por exemplo Garcia, Allen e Cardoso (2014, p.03) usaram a primeira lei de Fick representada na equação 10, para determinar a quantidade de ozônio em um determinado local, a mesma equação pode ser utilizada para outros gases bastando adequar os valores das variáveis na equação.

$$C_{oz} = In_{oz}(z/D_{oz\ air}\ \pi r^2 t \quad \text{(equação 10)}$$

Na equação 10 Coz é a concentração de ozônio no ar ambiente (em mols por centímetro cúbico), Inoz é a quantidade de ozônio (em mols) que reagiu com o corante indigo, Doz air é o coeficiente de difusão de ozônio no ar, que é 0,144 $cm^2$ $s^{-1}$ ,$\pi r^2$ é a área da seção transversal do amostrador passivo (em centímetros quadrados), z é o caminho de difusão (em centímetros), e t é o tempo de amostragem (em segundos) (GARCIA; ALLEN; CARDOSO, 2014, p.03) .

## 1 .6 A lei de Beer-Lambert e a colorimetria na medição de concentrações

A luz que o ser humano consegue enxergar é um tipo de radiação eletromagnética, é uma fração pequena do espectro eletromagnético. As técnicas que utilizam luz para medir concentrações de espécies químicas é chamada de espectrofotometria, quando o a técnica analítica utiliza absorção de luz visível o processo é chamado colorimetria. Na colorimetria ocorre variação da cor do sistema em virtude de mudança da concentração do componente (HARRIS, 2012, p. 420,421). A cor formada pode ser proveniente da reação química entre o analito e um reagente e é diretamente proporcional a quantidade do analito. O princípio básico da colorimetria é a comparação de intensidades de cor, a cor obtida com uma amostra é comparada com a intensidade da cor produzida por uma quantidade conhecida do mesmo material (VOGEL, 2022, p.351).

Na espectrometria quando a luz monocromática ou policromática atinge um meio homogêneo, parte da luz incidente sofre reflexão, parte é absorvida pelas moléculas do soluto presentes no caminho da luz, a luz restante é transmitida ao sensor (VOGEL, 2022, p.352). Os estudos sobre a relação entre a intensidade da luz absorvida e a concentração das soluções são as bases da lei de absorção, também conhecida como lei de **Beer-Lambert.** Esta lei considera que em uma determinada solução quanto mais longo for o caminho percorrido pela luz incidente, encontrará mais centros absorventes para atenuar luz incidente na amostra (SKOOG *et al*. ,2006, p. 678). Neste modelo matemático a intensidade de luz absorvida é função da concentração, do caminho óptico e da capacidade da molécula de interagir com a luz incidente.

As ligações moleculares têm a capacidade de absorver fótons de energia, quando isso ocorre a molécula vai para um patamar energético chamado estado excitado, se posteriormente a ligação molecular remite o fóton, a energia diminui e ela volta ao patamar energético inicial chamado de estado fundamental. A luz visível e a radiação ultravioleta causam a transferência de elétrons para orbitais de maior energia, a absorção de luz aumenta a energia da molécula. A emissão de luz diminui a energia da molécula (HARRIS, 2012, p.421).

A região de uma molécula que lhe permite absorver luz é chamada de cromóforo. Um cromóforo normalmente apresenta ligações π (pi), que são encontradas nas ligações duplas ou triplas, muitas vezes ocorre várias ligações

sequenciais duplas e simples que tendem a absorver radiação ultravioleta ou a luz visível com eficiência. (HAGE; CARR ,2012, p.436).

As substâncias que absorvem luz visível são observadas a olho nu como colorida quando a luz branca é transmitida através dela ou é refletida a partir dela. A substância absorve apenas determinados comprimentos de onda presentes na luz branca. Como resultado ela parece aos nossos olhos a cor correspondente aos comprimentos de onda que não são absorvidos. A cor observada é conhecida como cor complementar da cor absorvida (HARRIS, 2012, p. 424).

O comprimento de onda da radiação utilizada na análise colorimétrica deve ser a cor complementar da cor observada na solução do analito (SKOOG *et al*.,2006, p.685). Na Tabela 5 é apresentado a cor transmitida e a cor complementar correspondente. Por exemplo supondo que um analista tenha uma amostra de cor azul- esverdeado, esta amostra terá absorbância máxima entre os comprimentos de onda 595 a 610 nm, no caso de utilização de LED como fonte de emissão será necessário utilizar uma que emite luz laranja.

Tabela 5:Cores complementares.

| Comprimento de onda (nm) | Cor (transmitida) | Cor complementar |
|---|---|---|
| 400-435 | Violeta | Verde-amarelado |
| 435-480 | Azul | Amarelo |
| 480-490 | Azul-esverdeado | Laranja |
| 490-500 | Verde-azulado | Vermelho |
| 500-560 | Verde | Roxo |
| 560-580 | Verde-amarelado | Violeta |
| 580-595 | Amarelo | Azul |
| 595-610 | Laranja | Azul-esverdeado |
| 610-750 | Vermelho | Verde-azulado |

Fonte: VOGEL (2022, p.358).

Na colorimetria a medida da luz absorvida por uma amostra é feita comparando-se a quantidade inicial de luz aplicada ($P_0$) com a quantidade transmitida após a passagem da luz pela amostra (P), a luz transmitida é chamada de transmitância (T), então $T = P / P_0$. A transmitância apresenta uma relação não linear com a concentração, então pode-se usar o termo absorbância (A) que se relaciona melhor com a concentração, onde $A = -\log(T)$ (HAGE; CARR ,2012, p.421).

A absorbância é usada nas análises espectrofotométricas porque ela é diretamente proporcional a concentração do analito que absorve luz na amostra, é a base da Lei Beer-Lambert, e expressa a essência da espectrofotometria quando aplicada a química analítica (HARRIS, 2012, p. 423). A absorbância pode ser medida através de sensores em espectrofotômetros ou fotômetros.

### 1.7 Fotômetros de baixo custo

O uso de fotômetros de baixo custo não é novidade, equipamentos que empregam LED como fonte de radiação têm sido desenvolvidos e usados em diversas aplicações analíticas. Eles apresentam muitas vantagens na espectrofotometria de absorção molecular UV-Vis. já que podem ser equipamentos simples, portáteis e de baixo custo (DASGUPTA, *et al.* 1995; ROCHA; MARTELLI; REIS, BRAZ ,2004 apud GAIÃO *et al* .2005 p. 1102).

Nas últimas décadas, devido as facilidades de se adquirir materiais eletrônicos de baixo custo e de fácil utilização muitos pesquisadores têm publicado artigos científicos, dissertações e teses focando a construção de fotômetros e espectrofotômetros com estes materiais (OLIVEIRA; LEITE, 2016, p. 181).

Por exemplo Gaião *et al.* (2005) construíram um fotômetro de baixo custo utilizando como componentes principais seis LEDs como fontes de radiação, um fototransistor como detector, um microcontrolador e um monitor LCD, o fotômetro foi utilizado para análises de xaropes ferrosos e bioquímicas. O fotômetro construído com materiais alternativos foi comparado com instrumentos comerciais e apresentou desempenho satisfatório podendo ser uma alternativa viável para análises químicas em laboratórios de rotina, de pesquisa e/ou de ensino carentes de recursos financeiros.

Leite (2014) também manufaturou um fotômetro de baixo custo para ser utilizado na educação básica, foi utilizado como componentes principais um LDR (resistor dependente de luz) que é um fotorresistor que varia sua resistência de acordo com a intensidade de incidência de luz. Na montagem foi utilizado, um LED como fonte de radiação e um multímetro digital como dispositivo de leitura. Os resultados de medidas feitas com este equipamento foram comparados com os resultados de espectrofotômetro comercial e não apresentou diferença significativa.

A título de comparação, um espectrômetro básico contém quatro componentes principais, uma fonte de luz, um seletor de comprimento de onda, o compartimento da amostra e um detector para registro da luminosidade que atravessa a amostra (HAGE; CARR ,2012, p.421).

### 1.8 Importância da estatística na análise de dados experimentais

Crespo, (2020, p.04) define que “A Estatística é uma parte da Matemática Aplicada que fornece métodos para coleta, organização, descrição, análise e interpretação de dados e para a utilização deles na tomada de decisões”. Para Harris (2012, p. 72) as medidas experimentais não fornecem nenhuma conclusão com certeza absoluta, então a estatística atua oferecendo ferramentas que permitem conclusões sustentadas em probabilidade de estarem corretas. Desta forma a estatística apresenta ferramentas que permitem avaliar o quanto as medidas feitas por exemplo com os dois equipamentos representam estatisticamente o mesmo valor.

#### 1.8.1 Teste estatístico t- Student

A ferramenta estatística designada de teste t- Student é utilizada para decidir quando um dado experimental é igual a um valor teórico ou conhecido ou quando dois ou mais dados experimentais são idênticos, com um certo nível de confiança (SKOOG *et al*.,2006, G-19). Harris (2012, p. 80, 81) acrescenta que t-Student é usado para comparar médias e decidir se existe diferença significativa entre elas.

Com o teste t um valor de t é calculado, e caso t calculado for maior que o valor de t tabelado a um certo nível de confiança por exemplo 95% os dois resultados comparados são considerados significativamente diferentes e a diferença observada entre as duas médias não são provenientes de erro aleatório da medida, ou seja, existe uma chance de 95% das medidas analisadas não serem iguais. Mas se o valor de t calculado for menor que o valor de t tabelado então existe chance com 95% de confiança dos resultados serem estatisticamente iguais.

# 2 OBJETIVO

## 2.1 Objetivo Geral:

Mapear as possíveis diferenças de concentrações de e $O_3$ na área urbana de Rondonópolis ao longo de um ano utilizando amostradores passivos.

## 2.2 Objetivos específicos/metodologia

- Construir equipamento fotométrico “homemade” de baixo custo utilizando LEDs como fonte luminosa e sensor de luminosidade TSL 2561 microcontrolados por placa Arduino Uno;
- Avaliar a viabilidade do uso do fotômetro “homemade” na determinação das concentrações dos poluentes $NO_2$ e ozônio para tornar todas as etapas de processo viável e de baixo custo;
- Instalar amostradores passivos para coleta de $NO_2$ e ozônio em seis localidades do perímetro urbano da cidade de Rondonópolis a cada 15 dias durante aproximadamente um ano;
- Confrontar as médias de concentrações de $NO_2$ e ozônio encontrados em Rondonópolis com os limites estabelecidos pela legislação;
- Relacionar as concentrações de $NO_2$ e ozônio encontradas a efeitos diretos de possíveis fontes locais;
- Avaliar a influência do fator climático nas concentrações dos poluentes $NO_2$ e ozônio em Rondonópolis.

# 3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

## 3.1 Construção do amostrador passivo

O amostrador passivo utilizado foi construído de forma similar ao descrito por Souza, Francisco e Cardoso (2017, p.1234). Cada unidade do amostrador foi construída com 1 tubo cônico Falcon de 50 mL de polipropileno e duas tampas para o mesmo tipo de tubo. Para a superfície absortiva foi usado um filtro de celulose Whatman 41 recortado em círculo com 28 mm de diâmetro. O filtro de celulose deve ser impregnado com solução de trietanolamina 11% V/V para a coleta de $NO_2$ ou o corante índigotrisulfonado de potássio para ozônio.

O caminho de difusão do gás foi de 15 mm e corresponde a distância percorrida pelo gás entre a membrana de teflon que recobre o tubo e a superfície coletora. Desta forma o corte do tubo foi feito a 15 mm a partir da boca do tubo Falcon, onde está a rosca que serve para segurar a tampa. Na extremidade com rosca, encaixou-se a tampa que serve de suporte para colocar o filtro de celulose impregnado com o reagente. A outra extremidade do tubo foi fechada com uma membrana semipermeável de Teflon. A membrana foi feita com fita veda rosca que é encontrada no comércio de materiais para construção. A superfície da membrana separa a alíquota de ar da atmosfera que se quer analisar. Essa alíquota é formada pelo volume de um cilindro de ar entre a membrana e o filtro de coleta. Através da membrana o gás permeia para o interior do tubo e difundi até o filtro impregnado com o reagente. Com isto cria-se uma vazão do gás no interior do tubo. Após montado o amostrador passivo ele foi fechado com outra tampa para evitar trocas de gás entre interior e exterior do tubo. Para evitar o efeito da luz sobre os reagentes, o conjunto todo foi selado com fita isolante, utilizada para isolar conexões de circuitos elétricos. A tampa do amostrador foi retirada no início da amostragem e ao final da amostragem a tampa foi reposta no amostrador.

## 3.2 Reagentes e soluções utilizados

A água destilada utilizada para o preparo das soluções foi produzida com um destilador de água Tipo Pilsen marca QUIMIS.

### 3.2.1 Solução de trietanolamina 11% V/V

A solução de trietanolamina (TEA) 11% V/V absorvente de $NO_2$ foi preparada conforme Ugucione, Neto e Cardoso (2002, p .354) onde dissolveu-se 11 mL de TEA (Sigma-Aldrich), 3,6 mL de etilenoglicol (Sigma-Aldrich), 25 mL de acetona (Sigma-Aldrich) e completou-se o volume até 100 mL com água destilada. Cada filtro de celulose foi impregnado com 80 µL de solução de trietanolamina 11% V/V.

### 3.2.2 Reagente de Griess-Saltzman

O preparo do reagente de Griess-Saltzman também seguiu Ugucione, Neto e Cardoso (2002, p .354). Dissolveu-se 5,0 g de ácido sulfanílico (Sigma-Aldrich) em solução contendo 600 mL de água destilada, 140 mL de ácido acético glacial (Sigma-Aldrich), 20 mg de N-(1-naftil) -etilenodiamina (Sigma-Aldrich) e dilui-se para 1 L com água destilada.

### 3.2.3 Solução de índigo trissulfonado de potássio

A solução absorvente utilizada no amostrador para análise de ozônio foi preparada de acordo com o descrito por Garcia (2009, p. 31,32) onde foi utilizado solução de índigo com concentração $2,0 \times 10^{-3}$ mol/L , usando como solvente solução aquosa 50% V/V de etilenoglicol. A função do etilenoglicol nesta solução é de agente umectante, que facilita a reação do gás ozônio com o corante índigo na etapa de amostragem GARCIA (2009, p. 31).

Neste trabalho optou-se por iniciar a amostragem utilizando uma solução de concentração $1,0 \times 10^{-3}$ mol/L de indigo para diminuir a quantidade de reagente necessária, mas começou-se a observar aumento do consumo de índigo dos filtros, então a partir das amostragens realizadas em 16 de agosto começou-se a utilizar concentração $2,0 \times 10^{-3}$ mol/L de índigo para não correr o risco ter o consumo completo do índigo impregnado nos filtro e inviabilizar a análise. A solução $1,0 \times 10^{-3}$ mol/L foi preparada pesando-se 0,0062 g e a solução $2,0 \times 10^{-3}$ mol/L pesando-se 0,0124 g de indigotrisulfonado de potássio (Sigma-Aldrich), em ambos os casos seguido de dissolução em balão volumétrico de 10 mL contendo 5 mL de etilenoglicol (Sigma-Aldrich). O balão volumétrico foi avolumado até 10 mL com adição de água destilada.

Cada filtro de celulose foi impregnado com uma alíquota de 80 µL de solução de índigo , aplicado gota a gota no centro do filtro.

O índigo trissulfonado de potássio reage com ozônio rapidamente e o descoramento é diretamente proporcional à quantidade de ozônio (BADER; HOIGNÉ, (1981); LI *et al., (*2008).

### 3.2.4 Extração do analito $NO_2$ do filtro de celulose

Após a exposição, cada filtro foi transferido para um tubo Falcon de 50 mL para ser realizado a extração do analito $NO_2$.

A extração foi realizada com 5 mL de solução de etanol 5% V/V, alguns autores fazem uso de solução metanoica 5% V/V para esta etapa, porém como o metanol é tóxico optou-se pelo etanol que apresenta similar capacidade de dessorção (ROCHA, 2021, p.73). Para auxiliar a extração do analito dos filtros, utilizou-se uma seringa de polipropileno de 20 mL. Ela foi utilizada para succionar todo o eluato e retornar novamente para o tubo Falcon, este procedimento foi repetido três vezes.

### 3.2.5 Reação do $NO_2$ com o regente de Griess-Saltzman

Aos 5 mL de solução resultante da extração de $NO_2$ do filtro de celulose foi acrescentado reagente Griess-Saltzman até completar o volume do balão de 10 mL. O produto da reação tem coloração vermelho-violeta e a intensidade da coloração é proporcional a concentração do analito. Foi necessário aguardar 20 minutos para reação se completar e atingir a coloração máxima.

A solução vermelho-violeta apresenta absorbância em 550 nm ($\lambda_{max}$). A cor é resultado da formação de grupo cromóforo com o reagente de Griess-Saltzman e os íons nitrito, conforme representado na Figura 5.

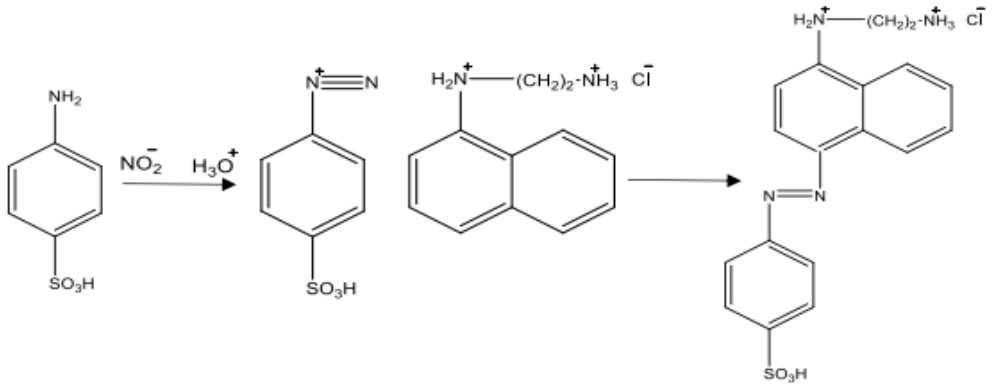


Figura 5:Reação do reagente de Griess Saltzman com $NO_2$.
Fonte: (ROCHA, 2021, p.56).

### 3.2.6 Ressolubilização do índigo do filtro

Cada filtro após a exposição no local de coleta foi transferido para tubo Falcon de 50 mL para que fosse realizado a extração do analito.

A extração do analito foi realizada com 10 mL de água destilada. A extração com água é uma alternativa viável tendo em vista a boa solubilidade do índigo nesse solvente, inclusive já foi utilizada por Garcia (2009, p. 33).

Para auxiliar a extração do analito dos filtros, utilizou-se uma seringa de polipropileno de 20 mL. Com a seringa succionou-se o eluato para transferi-lo novamente para o tubo Falcon por três vezes. A solução resultante tem coloração azul e a intensidade da coloração é proporcional a concentração do analito.

O ozônio presente na atmosfera promove a degradação do grupo cromóforo presente no reagente índigo trissulfonado de potássio, conforme representado na Figura 6. A quebra da molécula de índigo é que promove o descoramento do reagente impregnado no filtro do amostrador passivo. A quebra da molécula é resultante da reação com o ozônio e, portanto, proporcional concentração de ozônio existente no ar.

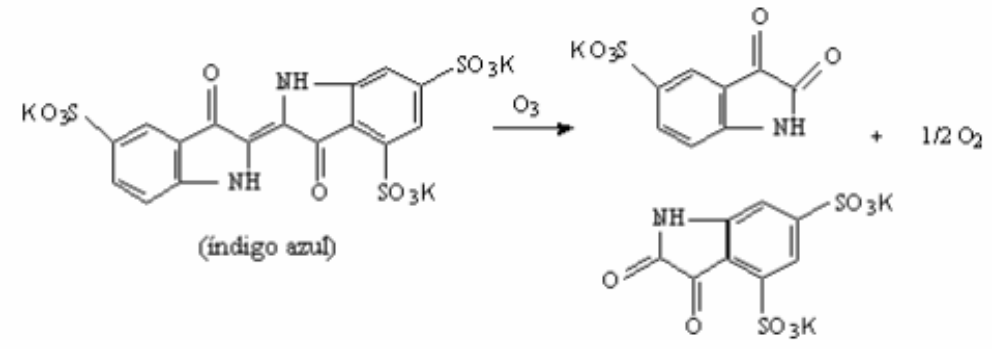


Figura 6:Reação do ozônio com índigo trissulfonado de potássio.
Fonte: GARCIA (2009, p. 27).

### 3.2.7 Preparo do padrão para $NO_2$ em nitrito equivalente

A solução aquosa estoque de nitrito de sódio foi preparada em balão volumétrico de 250 mL pela dissolução de 0,106 g de $NaNO_2$ (Sigma-Aldrich) em água destilada.

Para a solução trabalho foi retirada uma alíquota de 10 mL da solução estoque sendo feita a diluição para 500 mL com adição de água destilada. Esta solução apresentou uma concentração de 1,2 x $10^{-4}$ mol/L de $NaNO_2$.

Observações empíricas demonstram que 0,72 mol de $NaNO_2$ equivale a 1 mol de $NO_2$ na reação de Griess-Saltzman (LODGE 1989, p.393), assim 1,2 x $10^{-4}$ mol/L de $NaNO_2$ equivale a 1,7 x $10^{-4}$ mol/L de $NO_2$, então a solução de $NaNO_2$ foi utilizada como padrão equivalente para a construção da curva de calibração para $NO_2$.

### 3.3 Curvas de calibração para $NO_2$

#### 3.3.1 Espectrofotômetro Global Analyser

Da solução 1,7 x $10^{-4}$ mol/L de $NO_2$ equivalente foram pipetados 25, 50 ,100, 200, 400, 800, 1200 microlitros para balões volumétricos de 10 mL. Em cada balão foi acrescentado 80 µL de TEA 11% V/V e o final foi alcançado pela adição de reagente de Griess-Saltzman até completar o balão volumétrico. Após 20 minutos ocorreu o final da reação de formação do corante, então realizou-se as medições das amostras no espectrofotômetro em 550 nm ($\lambda_{max}$), utilizou-se cubetas de vidro de 3,5 mL com duas faces polidas e caminho óptico de 10,0 mm. O equipamento foi zerado com solução preparada com 5 mL de etanol 5%, 5 mL de reagente de Griess-Saltzman e 80 µL de TEA 11% V/V, esta solução foi designada de branco. O procedimento foi realizado em triplicata. A curva de calibração construída está apresentada na Figura 35.

#### 3.3.2 Fotômetro “homemade”

Para a curva de calibração do fotômetro “homemade” foram seguidos os mesmos procedimentos citados anteriormente para a curva de $NO_2$ com espectrofotômetro Global Analyser, porém utilizando cubetas de plástico e fonte de emissão uma led verde equivalente a $\lambda$ de 550 nm.

O sinal analítico disponível neste equipamento é intensidade luminosa, então é necessário calcular a transmitância (T), com $T = P / P_0$ onde $P_0$ representa a intensidade luminosa do branco e P a intensidade luminosa da solução com o analito. Também foi necessário calcular absorbância (A) com a equação: $A = -\log(T)$, os dados resultantes desta etapa estão disponíveis na Tabela 8, a concentração, as médias de absorbância e os desvios padrão foram utilizados para a construção da curva de calibração disponivel na Figura 36.

### 3.4 Curvas de calibração para ozônio

#### 3.4.1 Espectrofotômetro Global Analyser

Foi construída uma curva de calibração para determinar a concentração de ozônio utilizando reagente índigo trissulfonado de potássio. A curva pode ser utilizada para calcular indiretamente a concentração de ozônio, pois ele reage com indigo estequiometricamente ocorrendo descoramento, então basta subtrair os mols do branco de índigo com os mols de índigo restante após exposição das amostras essa diferença é a concentração de ozônio, ou seja [ozônio] = [indigo branco] - [indigo final], considera-se branco aqui a amostra que não foi exposta ao ar atmosférico.

Para esta etapa foi pesado 0,0616 g, de índigo trissulfonado de potássio e dissolvido com água destilada em um balão volumétrico até 250 mL. Considerando que a massa molar do índigo trissulfonado de potássio é 616,72 g/mol, a concentração solução foi de $4,0 \times 10^{-4}$ mol/L.

Da solução $4,0 \times 10^{-4}$ mol/L de índigo foram pipetados 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 microlitros em balões volumétricos de 10 mL, sendo o volume completado pela adição de água destilada. As medições destas amostras foram feitas no espectrofotômetro Global Analyser, com monitoramento em 600 nm ($\lambda_{max}$). O equipamento foi zerado com branco antes das medições, o branco foi a solução de concentração zero que é solução sem adição de analito. O procedimento foi realizado em triplicata. A curva de calibração construída está apresentada na Figura 38.

#### 3.4.2 Fotômetro “homemade”

Para a curva de calibração do fotômetro “homemade” foram seguidos os mesmos procedimentos citados anteriormente para a curva de ozônio com espectrofotômetro Global Analyser, porém aqui foi utilizado cubetas de acrílico plástico (caminho óptico 10,0 mm) e a fonte de luz de emissão foi um LED laranja equivalente a $\lambda$ de 600 nm.

O sinal analítico disponível neste equipamento é proporcional a intensidade luminosa emitido pelo LED laranja, então é necessário calcular a transmitância (T), com $T = P / P_0$ e a absorbância (A) como resultado da equação: $A = -\log(T)$. Os dados resultantes desta etapa estão disponíveis na Tabela 11, a concentração, as médias de absorbância e os desvios padrão foram utilizados para a construção da curva de calibração apresentados na Figura 39.

### 3.5 Características do fotômetro “homemade”

O fotômetro proposto e nomeado de “homemade” para ser utilizado neste trabalho é semelhante a um fotômetro de baixo custo produzido por Guadagnini, Rocha e Barlette 2019, o fotômetro foi pensado por eles para aplicações em laboratórios didáticos de ensino de Ciências, porém neste trabalho avaliou-se a possibilidade de utilizar um fotômetro de baixo custo para análise dos poluentes atmosféricos $NO_2$ e ozônio.

Os espectrofotômetros tradicionais ainda são equipamentos relativamente caros, nem sempre portáteis e com manutenção, como a troca de lâmpadas, que depende de produtos importados. Além disso nem todo pesquisador tem um à sua disposição especialmente em áreas remotas e carentes. Por outro lado, não se pode pensar que um fotômetro de baixo custo substitua completamente um fotômetro ou espectrofotômetro comercial, existem limitações que restringem seu uso.

No procedimento de coleta dos gases foi utilizado filtro de celulose impregnado com um reagente que coleta o analito, é um processo de preconcentração. A determinação analítica pode ser feita com a amostra que contém o analito que está muito concentrado com relação a concentração do gás presente na atmosfera. Então acredita-se que mesmo um fotômetro não comercial possa ser utilizado na determinação quantitativa do analito presente nesta nova amostra.

#### 3.5.1 Peças utilizadas no fotômetro “homemade”

##### 3.5.1.1 Sensor de luminosidade TSL2561

O detector de luminosidade escolhido para o protótipo do fotômetro “homemade” é o módulo sensor TSL2561 na qual é ilustrado na Figura 7.

.

Figura 7:Sensor TSL2561.
Fonte: Autor.

O TSL2561 é um sensor de luz digital pode ser usado em muitas situações envolvendo luz, permite cálculos exatos de lux (lux corresponde à incidência perpendicular de um lúmen em uma superfície de 1 metro quadrado) e pode ser configurado para detectar faixas de luz de 0,1 a 40.000 lux em tempo real. O TSL 2561 contém diodos infravermelhos e de espectro completo e pode medir espectro completo da luz visível humana conforme observado na resposta espectral indicado na Figura 8, a maioria dos outros sensores só podem detectar um ou outro, o que não representa com precisão o que os olhos humanos enxergam (ADAFRUIT,2012).

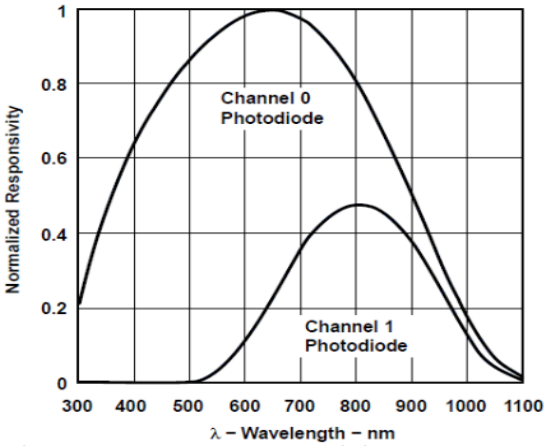

Figura 8: Resposta espectral do sensor TSL 2561.
Fonte: (ADAFRUIT,2012).

### 3.5.1.2 Placa Arduino UNO

Para este projeto foi usado a plataforma Arduino desenvolvida em 2005 por pesquisadores italianos, é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software construída de forma a facilitar o uso por pessoas iniciantes em programação e eletrônica.

> Arduino projeta, fabrica e suporta dispositivos eletrônicos e software, permitindo que pessoas em todo o mundo acessem facilmente tecnologias avançadas que interagem com o mundo físico. Nossos produtos são simples, simples e poderosos, prontos para satisfazer as necessidades dos usuários de alunos a fabricantes e até desenvolvedores profissionais (ARDUINO, 2021).

A ideia de Arduino está ligada a três conceitos, hardware que é a placa que possui um microcontrolador da família ATmega, o software que consiste na linguagem de programação e um ambiente de desenvolvimento e o último conceito

que é comunidade, onde muitas pessoas compartilham os seus conhecimentos e projetos na internet, disseminando a plataforma Arduino (OLIVEIRA *et al.,*2018, p.13). A placa Arduino é similar a um computador pequeno, o modelo Uno é um dos mais vendidos e é indicado para iniciantes (OLIVEIRA; ZANETTI ,2015, p.17).

A placa Arduino Uno (Figura 9) foi escolhida para o projeto do fotômetro “homemade” por ser uma placa robusta, bem conhecida internacionalmente e contar com boa quantidade de informações para pesquisadores iniciantes em projetos que envolvam eletrônica e programação.

Figura 9:Placa de Arduino UNO
Fonte: Autor.

### 3.5.1.3 Display LCD e módulo serial

É possível realizar a leitura do sinal analítico do fotômetro “homemade” com um computador na IDE do Arduino, a placa Arduino e o computador devem ser conectados via USB, porém para ter um sistema que não dependa de computador, o equipamento foi conectado a um display LCD 16:2 (Figura 10),o display apresenta 2 linhas sendo que em cada linha existe a possibilidade de indicar até 16 caracteres, ele foi conectado ao circuito usando um adaptador módulo serial I2C, pois este módulo permite diminuir a quantidade de conexões necessárias ao funcionamento do display, tornando o processo de conexão do display com a placa Arduino mais simples.

Figura 10:Display LCD 16:2 com módulo adaptador I2C
Fonte: Autor.

### 3.5.1.4 Potenciômetro

Um potenciômetro (Figura 11) é um resistor variável que através do giro de botão a saída de tensão é ajustada permitindo regular a quantidade de luz emitida pelo LED (LÜHMANN e OLIVEIRA, 2016, p.107).

Figura 11:Potenciômetro.
Fonte: Autor.

Antes de iniciar as análises com o fotômetro “homemade” é necessário verificar se a intensidade luminosa emitida pela LED é igual a utilizada para a construção da curva de calibração, pois pode ocorrer oscilações que devem ser corrigidas com o potenciômetro. Desta forma foi escolhido um potenciômetro do tipo linear de resistência ôhmica, o que se mostrou mais adequado foi o de 1K ohms.

### 3.5.1.5 Lâmpada de LED

Uma lâmpada de LED (Figura 12) é um diodo emissor de luz, onde ocorre emissão de luz quando uma corrente flui pelo materiais componentes do LED.

O LED possui conexões metálicas para o cátodo e ânodo, o cátodo deve ser conectado ao polo negativo do circuito (OLIVEIRA *et al.,*2018, p.13).

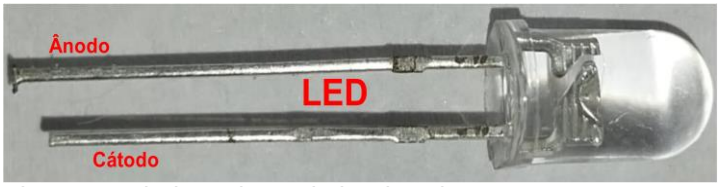


Figura 12:Diodo emissor de luz (LED).
Fonte: Autor.

### 3.5.1.6 Resistor

Os resistores são peças importantes que evitam correntes elevadas que podem danificar os componentes eletrônicos do circuito, principalmente o LED.

Existem diferentes tipos de resistores, de acordo com Lühmann e Oliveira, (2016, p.33) o “resistor tem a função de limitar a corrente elétrica protegendo os outros

componentes eletrônicos. Seu valor de resistência é definido por faixas coloridas em seu corpo”. Na Figura 13 é indicado um dos vários tipos de resistores existentes.

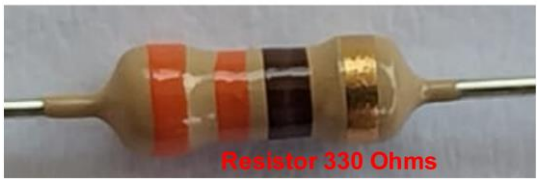


Figura 13:Resistor de 330 Ohms.
Fonte: Autor.

### 3.5.1.7 Fonte de alimentação

É recomendado que a placa Arduino UNO seja alimentada com tensão entre 7-12 volts, então para a alimentação de energia do conjunto aqui proposto optou -se por uma fonte chaveada de 9 volts (Figura 14). Porém a placa Arduino pode ser utilizada com bateria de 9 volts, isso é outro fator positivo pois permite a realização de análises em locais onde não exista eletricidade disponível, mas neste trabalho não foi testado baterias como fonte de alimentação.

Figura 14:Fonte chaveada.
Fonte: Autor.

### 3.5.2 Código de programação do fotômetro “homemade”

A parte lógica do fotômetro funciona com uma placa de Arduino Uno, a programação do código é feita em um sistema disponibilizado gratuitamente no site https://www.arduino.cc/. “Neste site e em muitos outros, também estão disponíveis as instruções para realizar a instalação em diversos sistemas operacionais, além de fóruns para tirar dúvidas e obter maiores informações” (OLIVEIRA *et al.,*2018, p.14).

Uma possibilidade interessante para desenvolver o código de programação é o GPTchat desenvolvido pela empresa “A OpenAI que é uma empresa de pesquisa e implantação de IA. Nossa missão é garantir que a inteligência artificial geral beneficie toda a humanidade”. (OPENAI) este é um sistema disponível gratuitamente.

Foi testado códigos de programação gerados pelo GPTchat, é preciso realizar cadastro e login no site da OPENAI, com a inserção das palavras-chave: **código fonte sensor TSL 2561 + display LCD 16:2 + módulo adaptador I2C + Arduino Uno**, o GPTchat gerou um código fonte conforme ilustrado na Figura 15.

No anexo 8.3 deste trabalho está disponível um código completo gerado pelo GPTchat, para utilizá-lo no fotômetro “homemade” foi realizado a inserção do código na placa Arduino através do IDE do Arduino que é o ambiente de programação do Arduino  ilustrado na Figura 16.Porém é importante mencionar que o sistema GPTchat não gerou em todas as vezes que foi solicitado um código fonte que funcionou no fotômetro “homemade”, foi necessário solicitar ao sistema várias vezes a geração de código, em cada uma o sistema gerou um código diferente, eles foram testados no fotômetro “homemade” até encontrar o adequado. Outro fato é que acompanhado do código fonte o GPTchat também traz instruções  para a utilização do código fonte o que pode auxiliar principalmente iniciantes em Arduino.

Figura 15:Código Fonte gerado pelo GPT chat.
Fonte: OPENAI.

```
Arquivo  Editar  Sketch  Ferramentas  Ajuda
Teste_1
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_TSL2561_U.h>

// Defina o endereço I2C do display LCD 16x2
#define LCD_ADDR 0x27

// Inicialize o objeto do display LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDR, 16, 2);

// Inicialize o objeto do sensor TSL2561
Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 12345);

void setup() {
  // Inicialize a comunicação I2C
  Wire.begin();

Carregado.
O sketch usa 9070 bytes (28%) de espaço de armazenamento para programas. O máximo são 32256 bytes.
Variáveis globais usam 568 bytes (27%) de memória dinâmica, deixando 1480 bytes para variáveis locais. O máximo são 2048 b
Biblioteca inválida encontrada em C:\Users\wtbue\OneDrive\Documentos\Arduino\libraries\Downloads: no headers files (.h) fo
```

Figura 16: IDE (Ambiente de programação do Arduino).
Fonte: Arduino.

### 3.5.3 Esquema de ligação do fotômetro “homemade”

O esquema de ligação apresentado na Figura 17 foi feito no programa fritzing, ele é baixado no site https://fritzing.org/, nele os componentes estão disponíveis bastando apenas realizar a ligação, ou fazer alguma adaptação em esquemas prontos disponíveis no site. Os esquemas de ligação feitos no fritzing são ideais para iniciantes em eletrônica pois permitem facilmente compreender as conexões, ao contrário de outros modelos de esquemas de ligação na qual é necessário ter conhecimento avançado em eletrônica para compreender o significado.

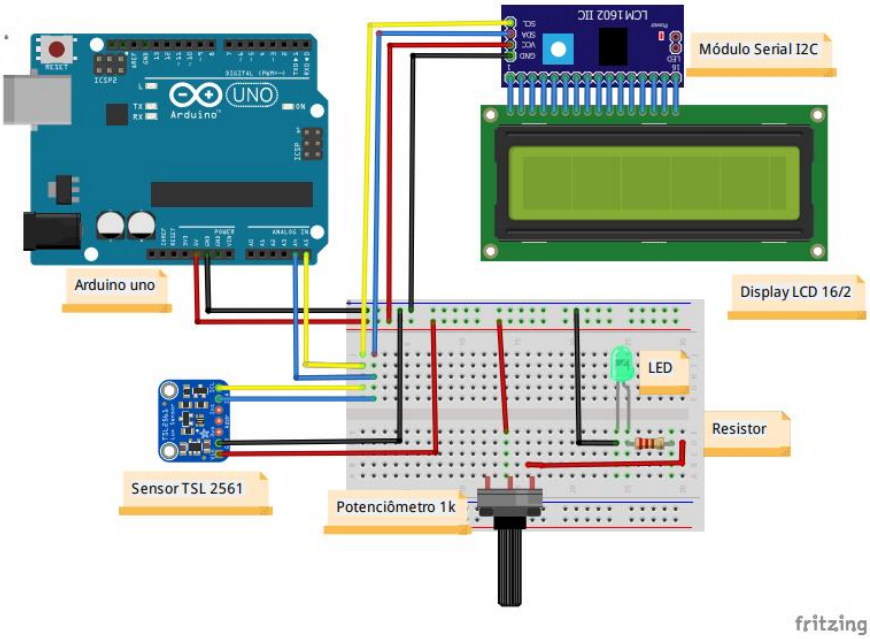


Figura 17:Esquema de ligação fotômetro “homemade”.
Fonte: Autor (elaborado com: https://fritzing.org/).

### 3.5.4 Esquema de ligação dos componentes no porta cubeta

O porta cubeta do fotômetro “homemade” foi impresso em impressora 3D e os componentes, cubeta, LED e sensor TSL 2561 foram instalados em com um esquema apresentado na Figura 18.

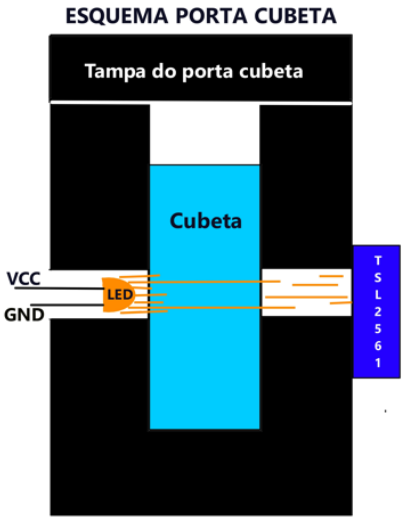


Figura 18:Esquema porta cubeta fotômetro “homemade”.
Fonte: Autor.

### 3.5.5 Caixa para acondicionar o fotômetro “homemade”

Os componentes do protótipo do fotômetro foram montados em uma caixa de material MDF *“Medium Density Fiberboard”* com medidas 15 x 15 x 6,5 cm (Figura 19) é um caixa disponível em lojas de produtos de artesanato no comércio em Rondonópolis, o MDF é um material barato e fácil para fazer cortes para encaixar componentes do fotômetro, a caixa de MDF foi pintada de preto com tinta guache.

Figura 19:Fotômetro "homemade".
Fonte: Autor.

### 3.6 Locais e datas de instalação dos amostradores em Rondonópolis

As amostras de ar atmosférico foram coletadas em locais que permitem comparar as concentrações dos poluentes $NO_2$ e $O_3$ em diferentes áreas da cidade. Como descrito nos objetivos deste projeto pretendeu-se mapear áreas teoricamente críticas com relação a concentrações de $NO_2$ e ozônio em Rondonópolis. Os locais previamente definidos foram: uma casa no bairro Vila Mineira (Casa), escola estadual Daniel Martins Moura (Daniel), terminal rodoviário Alberto Luz (Rodo), escola estadual Professor Alfredo Marien (Alfredo), posto de combustível Aldo (Aldo) e o estacionamento da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR),os seis locais estão destacados no mapa na Figura 20.

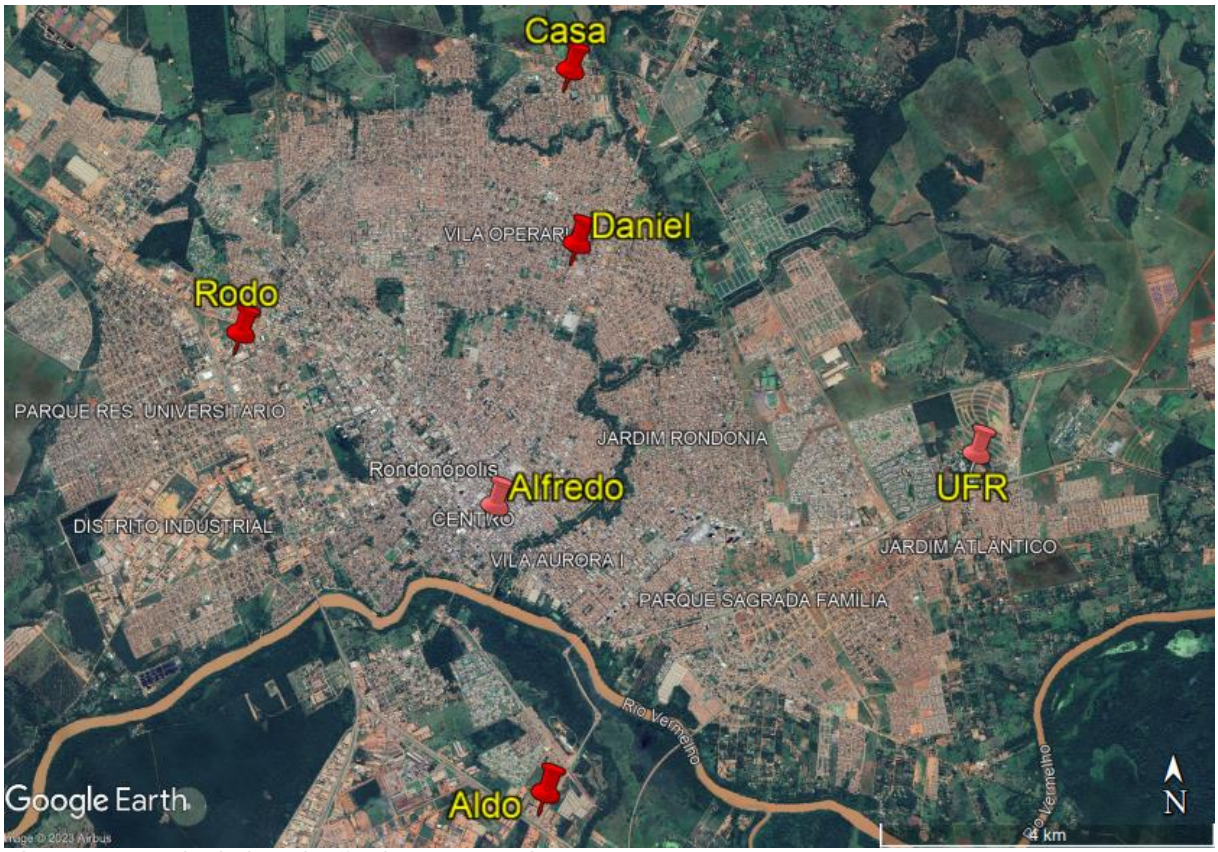

Figura 20:Locais de instalação dos amostradores.
Fonte: Google Earth Pro.

Na Figura 21 consta um mapa onde é destacando com uma linha azul o deslocamento entre os seis pontos para instalações dos amostradores que foi de cerca de 25 Km.

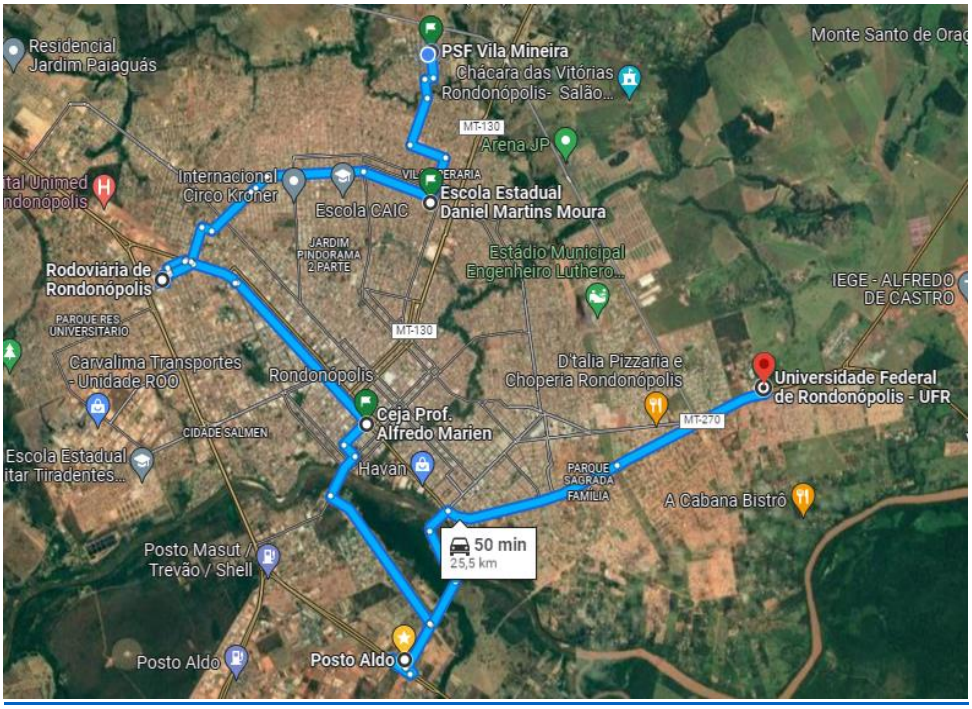


Figura 21:Mapa indicação deslocamento instalação amostradores
Fonte: google maps.

Os amostradores foram instalados e recolhidos no dia seguinte após aproximadamente 24 horas (diferenças devido ao tempo de instalação e coleta dos amostradores). No segundo semestre também houve amostragens de 8 horas nos locais Casa e UFR nas mesmas datas que as amostragens de 24 horas. No local Alfredo no dia 14/07 realizou-se três vezes seguidas amostragens de 8 horas e uma de 24 horas. As datas de amostragem são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6:Datas das amostragens.

| Amostragem | Data início | Data final | Amostragem | Data início | Data final |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 13/12/2021 | 14/12/2002 | 13 | 28/06/2022 | 29/06/2022 |
| 2 | 04/01/2022 | 05/01/2022 | 14 | 13/07/2022 | 14/07/2022 |
| 3 | 10/01/2022 | 11/01/2022 | 15 | 26/07/2022 | 27/07/2022 |
| 4 | 26/01/2022 | 27/01/2022 | 16 | 16/08/2022 | 17/08/2022 |
| 5 | 09/02/2022 | 10/02/2022 | 17 | 29/08/2022 | 30/08/2022 |
| 6 | 22/02/2022 | 23/02/2022 | 18 | 10/09/2022 | 11/09/2022 |
| 7 | 15/03/2022 | 16/03/2022 | 19 | 17/09/2022 | 18/09/2022 |
| 8 | 29/03/2022 | 30/03/2022 | 20 | 15/10/2022 | 16/10/2022 |
| 9 | 19/04/2022 | 20/04/2022 | 21 | 05/11/2022 | 06/11/2022 |
| 10 | 05/05/2022 | 06/05/2022 | 22 | 22/11/2022 | 23/11/2022 |
| 11 | 25/05/2022 | 26/05/2022 | 23 | 12/12/2022 | 13/12/2022 |
| 12 | 07/06/2022 | 08/06/2022 | | | |

Fonte: Autor.

### 3.6.1 Critérios para escolha dos locais de instalação dos amostradores

Os locais foram escolhidos por estarem perto de vias com grande fluxo de veículos que são fontes potenciais de emissão de $NO_2$. No ponto de amostragem Casa na Vila Mineira destacado no mapa na Figura 22 é possível visualizar que nas proximidades está o anel viário Conrado Sales Brito onde há grande circulação de veículos porque serve de acesso a vários bairros dentro do próprio município e de ligação entre as vias MT 130, BR 163 e Avenida Bandeirantes que é bastante movimentada pois atravessa a área urbana de Rondonópolis de Norte a Sul.

Figura 22:Local de amostragem Casa no bairro Vila Mineira.
Fonte: Google Earth Pro.

Na Figura 23 é possível visualizar a instalação do amostrador passivo no local Casa.

Outro ponto de amostragem é a escola estadual Daniel Martins Moura ela está em uma região com grande circulação de pessoas e veículos a Vila Operária, é uma região bastante significativa em termos comerciais e populacionais. Próximo a escola Daniel (Figura 24) também existem vias bastante movimentadas ligando vários bairros e o centro da cidade.

Figura 23:Instalação do amostrador no local Casa.
Fonte: Autor.

Figura 24:Local de amostragem Daniel na Vila Operária.
Fonte: Google Earth Pro.

Na Figura 25 é possível visualizar a instalação do amostrador passivo no estacionamento da escola Daniel.

Figura 25:Instalação do amostrador na escola Daniel.
Fonte: Autor.

No ponto de amostragem do terminal rodoviário no Jardim Belo Horizonte, (Figura 26) existe grande movimentação de veículos e também em vias próximo a ele como as rodovias BR 163 e MT 270.

Figura 26:Local amostragem Rodo no terminal rodoviário Alberto Luz.
Fonte: Google Earth Pro.

Na Figura 27 é possível visualizar o local de instalação do amostrador no teto de um lugar utilizado pelos taxistas para espera de passageiros na rodoviária.

Figura 27:Amostrador instalado no terminal rodoviário
Fonte: Autor.

A escola estadual Professor Alfredo Marien está localizada na área central da cidade conforme pode ser observado na Figura 28, é um local com grande movimentação de veículos e pessoas no período diurno.

Figura 28:Local de instalação amostrador Alfredo Marien.
Fonte: Google Earth Pro.

Figura 29:Amostrador instalado na escola Alfredo Marien.
Fonte: Autor.

Na Figura 29 é possível observar o amostrador instalado em uma janela na escola Alfredo Marien.

O local no estacionamento no posto de combustível Aldo indicado na Figura 30, foi escolhido porque existem grande fluxo de veículos principalmente caminhões e está a margem de vias com grande fluxo de veículos, a rodovia BR 364 e a Avenida Otaviano Muniz que dá acesso da BR 364 para a área urbana da cidade, o posto Aldo também está próximo ao Parque Industrial Vetorasso.

Figura 30:Local de amostragem no posto de combustíveis Aldo.
Fonte: Google Earth Pro.

Na Figura 31 é possível observar o amostrador instalado em alambrado no estacionamento do posto de combustíveis Aldo.

Figura 31:Amostragem posto Aldo.
Fonte: Autor.

Na Figura 32 observa-se o amostrador instalado em um local no estacionamento da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), verifica-se na Figura 33 que ele está próximo a vias de intenso fluxo de veículos a Avenida dos Estudantes, Rodovia MT-270 e o anel viário Conrado Sales Brito e o bairro Jardim Atlântico este é densamente povoado.

Figura 32:Amostrador instalado no estacionamento da UFR.
Fonte: Autor.

Figura 33:Local de amostragem na UFR.
Fonte: Google Earth Pro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de 12 meses foram feitas 23 amostragens, no início das amostragens o fotômetro “homemade” ainda estava em fase de construção, então destas apenas 17 foram analisadas utilizando ambos os equipamentos o espectrofotômetro Global Analyser e o fotômetro “homemade” (Figura 34) com a finalidade de realizar comparação entre os resultados.

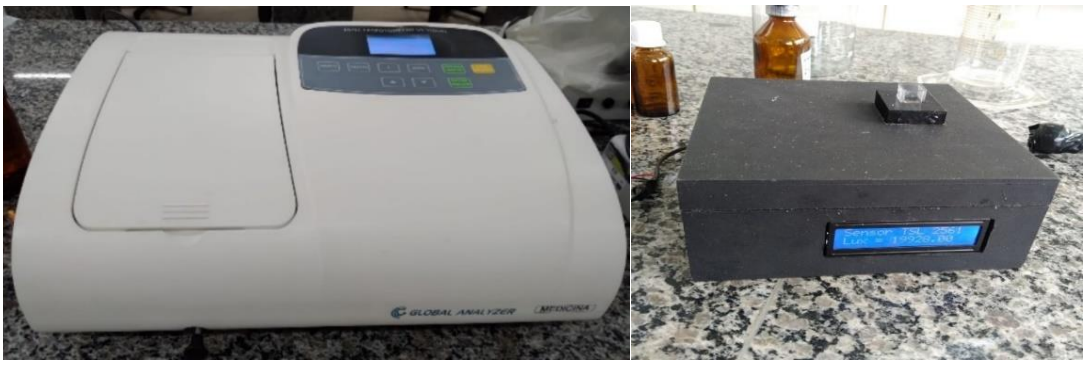


Figura 34:Espectrofotômetro Analyser e Fotômetro “Homemade”.
Fonte: Autor.

### 4.1 Parâmetros usados para validação da curva analítica

Hauser, Rupasinghe e Cates (1995, p.608-609) relatam que é possível realizar a comparação das medidas obtidas por equipamentos do tipo dos utilizados neste trabalho monitorando-se os valores de $\lambda_{max}$ das curva de calibração, como em ambos os equipamentos as cubetas apresentam o mesmo comprimento de caminho óptico (10 mm), assim, é possível comparar diretamente os resultados. Então neste trabalho também foi adotado um procedimento para avaliar o desempenho analítico dos equipamentos analisando a curva analítica.

Os parâmetros estatísticos avaliados das curvas analíticas construídas com o espectrofotômetro Global Analyser e com o fotômetro “homemade” para $NO_2$ e ozônio foram: linearidade, desvio padrão, teste t-Student, desvio padrão do coeficiente angular e linear, limite de detecção e limite de quantificação, eles são discutidos nos tópicos a seguir.

#### 4.1.1 Linearidade e desvio padrão da curva analítica para $NO_2$

A linearidade refere-se à faixa de concentrações na qual o sinal do detector é diretamente proporcional à concentração do analito. Portanto a resposta medida pelo detector para cada concentração resulta a linearidade do gráfico de calibração

resultante (VOGEL, 2022, p.165). Dessa forma os pontos do gráfico podem ser unidos por uma linha reta ajustada.

As curvas analíticas para $NO_2$ demostradas nas Figuras 35 e 36 foram construídas com base nos dados apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7:Dados para curva de calibração para $NO_2$ com Global Analyser.

| Volume pipetado | Concentração µmol/L | Abs 1 | Abs 2 | Abs 3 | Média Abs | Desvio padrão média |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 uL | 0,221 | 0,013 | 0,009 | 0,01 | 0,011 | 0,002 |
| 50 uL | 0,442 | 0,02 | 0,022 | 0,02 | 0,021 | 0,001 |
| 100 uL | 0,885 | 0,056 | 0,044 | 0,043 | 0,048 | 0,007 |
| 200 uL | 1,770 | 0,099 | 0,101 | 0,099 | 0,100 | 0,001 |
| 400 uL | 3,540 | 0,191 | 0,198 | 0,199 | 0,196 | 0,004 |
| 800 uL | 7,080 | 0,369 | 0,399 | 0,401 | 0,390 | 0,018 |
| 1200 uL | 10,620 | 0,573 | 0,578 | 0,582 | 0,578 | 0,005 |

Fonte: Autor.

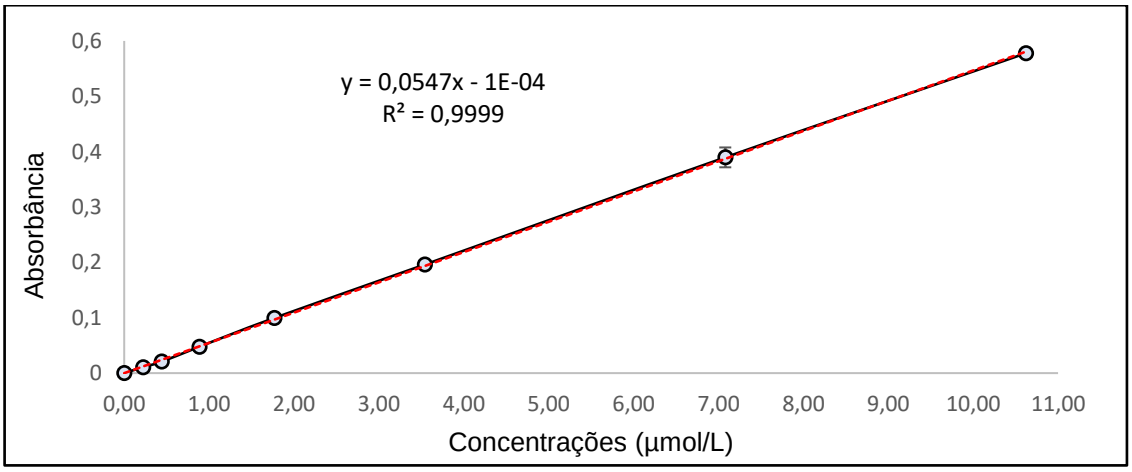


Figura 35:Curva calibração para $NO_2$ utilizando o espectrofotômetro Global Analyser, com monitoramento em 550 nm.
Fonte: Autor.

Tabela 8:Dados para curva de calibração para $NO_2$ com "homemade".

| Volume pipetado | Concentração µmol/L | Abs 1 | Abs 2 | Abs 3 | Média Abs | Desvio padrão Média |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 uL | 0,221 | 0,020 | 0,022 | 0,020 | 0,021 | 0,001 |
| 50 uL | 0,442 | 0,031 | 0,033 | 0,028 | 0,031 | 0,002 |
| 100 uL | 0,885 | 0,050 | 0,050 | 0,046 | 0,049 | 0,003 |
| 200 uL | 1,77 | 0,094 | 0,100 | 0,091 | 0,095 | 0,004 |
| 400 uL | 3,54 | 0,172 | 0,180 | 0,174 | 0,176 | 0,004 |
| 800 uL | 7,08 | 0,334 | 0,332 | 0,325 | 0,330 | 0,005 |
| 1200 uL | 10,6 | 0,506 | 0,498 | 0,500 | 0,501 | 0,004 |

Fonte: Autor.

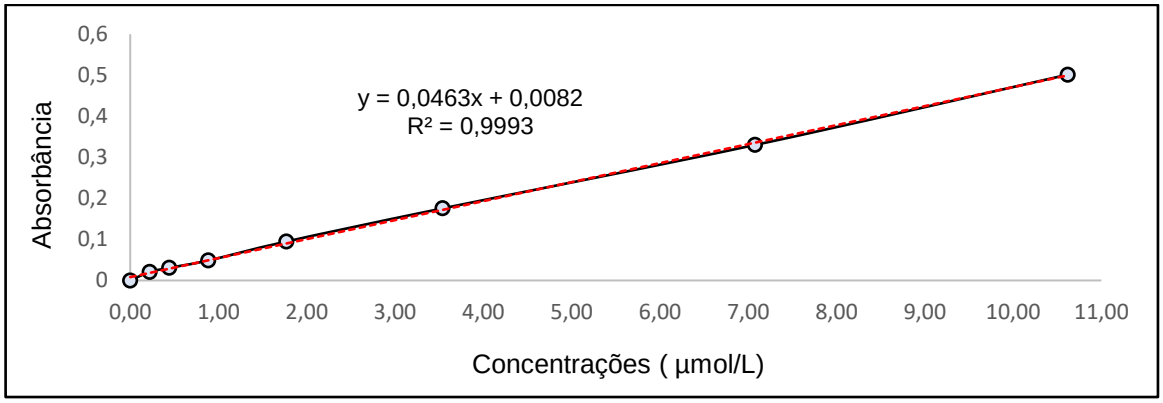


Figura 36:Curva de calibração para $NO_2$ com fotômetro "homemade" utilizando LED verde.
Fonte: Autor.

Verifica-se que as curvas analíticas nas Figuras 35 e 36 exibem boa relação linear entre o sinal de absorbância medido e a concentração das soluções de calibração. A comprovação pode ser feita visualmente no gráfico, já que existe uma linha que se aproxima de uma linha reta, o que também é confirmado analisando os valores de $R^2$ que em ambas as curvas se aproximam de 1. Quanto mais próximo de 1, maior é relação linear entre sinais de absorbância e as diferentes concentrações.

Os valores de desvios padrão são pequenos em relação a escala utilizada nas curvas analíticas por isso é difícil visualizar os referidos desvios padrão nas curvas analíticas sendo necessário analisar os valores nas Tabelas 7 e 8.

Ainda comparando as curvas de calibração juntas (Figura 37) observa-se que os dois equipamentos (espectrofotômetro Global Analyser e fotômetro “homemade”) são muito parecidos quanto a linearidade, conforme observa-se visualmente nas linhas laranja e azul e $R^2$.

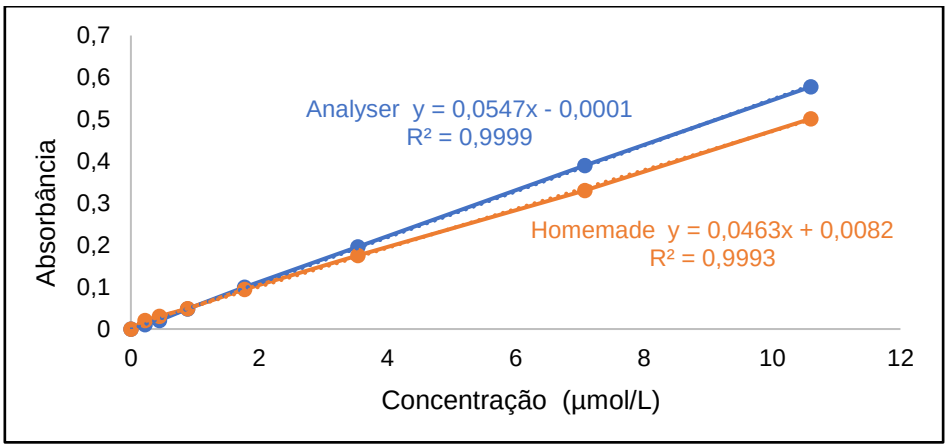


Figura 37:Curvas calibração para $NO_2$ equipamentos Analyser e “homemade”.
Fonte: Autor.

### 4.1.2 Teste t-Student para curvas de $NO_2$ Analyser x homemade

Com a finalidade de comparar os dois equipamentos também foi realizado teste t-Student para as médias dos valores de absorbância constantes nas Tabelas 07 e 08. Os valores obtidos com o t-Student revelam que os resultados obtidos com os dois equipamentos são idênticos a nível de confiança de 95 %. Observa-se na Tabela 9 que o valor de t calculado (Stat t) é menor do que t tabelado (t crítico bi-caudal). O t-Student realizado foi seguido os passos detalhados no anexo 8.1 deste trabalho.

Tabela 9:Teste - t curva $NO_2$ Analyser x homemade.

| | Analyser | Homemade |
|---|---|---|
| Média | 0,192 | 0,1719 |
| Variância | 0,04657 | 0,0328 |
| Observações | 7 | 7 |
| Variância agrupada | 0,0397 | |
| Hipótese da diferença de média | 0 | |
| gl | 12 | |
| Stat t | 0,18913 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 0,42657 | |
| t crítico uni-caudal | 1,78229 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 0,85315 | |
| t crítico bi-caudal | 2,17881 | |

Fonte: Autor.

### 4.1.3 Desvio padrão coeficiente angular e linear da curva analítica para $NO_2$

O desvio padrão do coeficiente angular 0,0547 do espectrofotômetro Global Analyser é de ± 2,67 x $10^{-4}$, e o desvio padrão para o coeficiente linear 1,00 x $10^{-4}$ é de ± 1,27 x $10^{-3}$. Já para o fotômetro “homemade” o desvio padrão do coeficiente angular 0,0463 é de ± 4,91 x $10^{-4}$, e o desvio padrão para o coeficiente linear 8,23 x $10^{-3}$ é de ± 2,30 x $10^{-3}$.

### 4.1.4 Limite de detecção (LD) para $NO_2$

Com o espectrofotômetro Global Analyser o limite de detecção LD, calculado como 3 vezes o desvio padrão da flutuação do sinal do branco, foi de 6,96 x $10^{-2}$ µmol/L, já para o fotômetro “homemade” foi de 1,49 x $10^{-1}$ µmol/L, como pode ser observado o espectrofotômetro Global Analyser consegue detectar a presença de menores concentrações de $NO_2$.

### 4.1.5 Limite de quantificação (LQ) para $NO_2$

Com o espectrofotômetro Global Analyser o limite de quantificação calculado com a curva analítica é de 2,32 x $10^{-1}$ µmol/L e para o fotômetro "homemade" o limite de quantificação é de 4,96 x $10^{-1}$ µmol/L. Como pode ser observado o espectrofotômetro Global Analyser consegue quantificar menores concentrações de $NO_2$ do que o fotômetro "homemade"

### 4.1.6 Linearidade e Desvio padrão da curva analítica para ozônio

As curvas analíticas para ozônio demostradas nas Figuras 38 e 39 foram construídas com base nos dados apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10:Dados para curva de ozônio medido com espectrofotômetro Analyser.

| Volume pipetado | Concentração índigo µmol/L | Abs 1 | Abs 2 | Abs 3 | Média Abs | Desvio padrão Média |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 ul | 0,499 | 0,008 | 0,009 | 0,006 | 0,008 | 0,0015 |
| 10 ul | 0,998 | 0,013 | 0,016 | 0,016 | 0,015 | 0,0017 |
| 20 ul | 1,998 | 0,034 | 0,032 | 0,034 | 0,033 | 0,0012 |
| 40 ul | 3,995 | 0,074 | 0,076 | 0,072 | 0,074 | 0,0020 |
| 60 ul | 5,993 | 0,109 | 0,108 | 0,11 | 0,109 | 0,0010 |
| 80 ul | 7,991 | 0,145 | 0,146 | 0,144 | 0,145 | 0,0010 |
| 100 ul | 9,988 | 0,179 | 0,178 | 0,182 | 0,180 | 0,0021 |
| 120 ul | 11,99 | 0,213 | 0,221 | 0,219 | 0,218 | 0,0042 |
| 140 ul | 13,98 | 0,254 | 0,251 | 0,253 | 0,253 | 0,0015 |

Fonte: Autor.

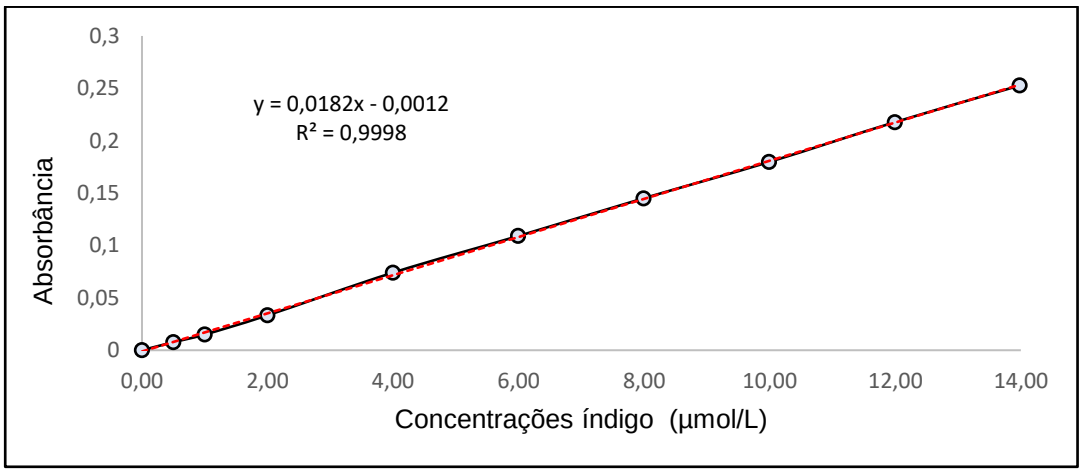


Figura 38:Curva calibração para ozônio com espectrofotômetro Global Analyser com monitoramento em 600 nm.
Fonte: Autor.

Tabela 11:Dados para curva de ozônio medido com fotômetro “homemade”.

| Volume pipetado | Concentração índigo µmol/L | Lux 1 | Lux 2 | Lux 3 | Abs 1 | Abs 2 | Abs 3 | Média Abs | Desvio Padrão Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 ul | 0,499 | 1189 | 1197 | 1207 | 0,014 | 0,011 | 0,005 | 0,010 | 0,005 |
| 10 ul | 0,998 | 1153 | 1156 | 1158 | 0,027 | 0,026 | 0,023 | 0,025 | 0,002 |
| 20 ul | 1,998 | 1119 | 1113 | 1112 | 0,040 | 0,043 | 0,040 | 0,041 | 0,001 |
| 40 ul | 3,995 | 1033 | 1031 | 1033 | 0,075 | 0,076 | 0,072 | 0,074 | 0,002 |
| 60 ul | 5,993 | 953 | 950 | 945 | 0,110 | 0,111 | 0,111 | 0,111 | 0,001 |
| 80 ul | 7,991 | 881 | 883 | 874 | 0,144 | 0,143 | 0,145 | 0,144 | 0,001 |
| 100 ul | 9,988 | 822 | 814 | 815 | 0,174 | 0,179 | 0,175 | 0,176 | 0,002 |
| 120 ul | 11,99 | 751 | 765 | 749 | 0,213 | 0,206 | 0,212 | 0,210 | 0,004 |
| 140 ul | 13,98 | 718 | 717 | 710 | 0,233 | 0,234 | 0,235 | 0,234 | 0,001 |

Fonte: Autor.

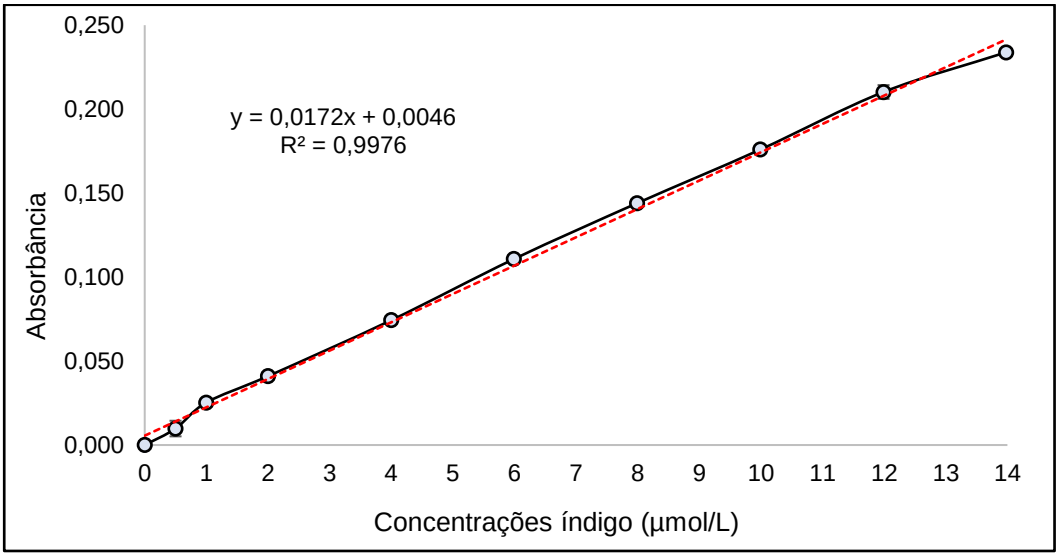


Figura 39:Curva calibração para ozônio com fotômetro “homemade” utilizando LED Laranja.
Fonte: Autor.

Verifica-se que as curvas (Figuras 38 e 39) exibem boa relação linear entre o sinal de absorbância medido e a concentração das soluções de calibração, isso pode ser comprovado visualmente no gráfico, existe uma linha que se aproxima de uma linha reta. Isso também é confirmado analisando os valores de $R^2$ que em ambas as curvas se aproximam de 1. Os valores de desvios padrão são pequenos em relação a escala utilizada nas curvas analíticas por isso é difícil visualizar os referidos desvios padrão nas curvas sendo necessário analisar os valores nas Tabelas 10 e 11.

Ainda comparando as curvas de calibração juntas (Figura 40) observa-se que os dois equipamentos (espectrofotômetro Global Analyser e fotômetro “homemade”) são muito parecidos quanto a linearidade, conforme observa-se visualmente nas linhas laranja e azul e os valores de coeficiente angular e linear e $R^2$.

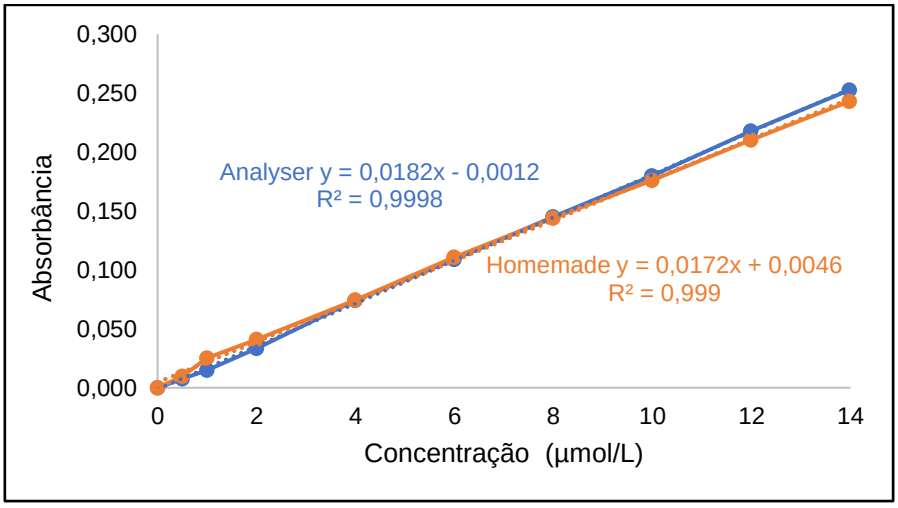


Figura 40:Curvas calibração para ozônio equipamentos Analyser e “homemade”.
Fonte: Autor.

### 4.1.7 Teste t-Student para curvas de ozônio Analyser x homemade

Com a finalidade de avaliar se os dois equipamentos apresentaram resultados estatisticamente iguais também foi realizado teste t-Student para as médias dos valores de absorbância constantes nas Tabelas 10 e 11.

Observando os dados da Tabela 12 é possível concluir que os valores experimentais obtidos com os dois equipamentos são idênticos a nível de confiança de 95%, pois o valor de t calculado (Stat t) é menor do que o valor de t tabelado (t crítico bi-caudal), para este teste também foi seguido os passos detalhados no anexo 8.1 deste trabalho.

Tabela 12:Teste-t curva ozônio Analyser x homemade.

| | Comer | Home |
|---|---|---|
| Média | 0,115 | 0,1139 |
| Variância | 0,00808 | 0,0068 |
| Observações | 9 | 9 |
| Variância agrupada | 0,00742 | |
| Hipótese da diferença de média | 0 | |
| gl | 16 | |
| Stat t | 0,02736 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 0,48925 | |
| t crítico uni-caudal | 1,74588 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 0,97851 | |
| t crítico bi-caudal | 2,11991 | |

Fonte: Autor.

### 4.1.8 Desvio padrão coeficiente angular e linear da curva analítica ozônio

Para o espectrofotômetro Global Analyser o desvio padrão do coeficiente angular é de $1,80 \times 10^{-2} \pm 1,04 \times 10^{-4}$, e o desvio padrão para o coeficiente linear é de $-1,04 \times 10^{-2} \pm 7,78 \times 10^{-4}$, para a curva de calibração usada para quantificação de ozônio com fotômetro "homemade" o desvio padrão do coeficiente angular é de $1,72 \times 10^{-2} \pm 1,92 \times 10^{-4}$, já o desvio padrão para o coeficiente linear é de $4,63 \times 10^{-3} \pm 1,44 \times 10^{-3}$.

### 4.1.9 Limite de detecção (LD) para ozônio

Com o espectrofotômetro Global Analyser o limite de detecção calculado como 3 vezes o desvio padrão da flutuação do sinal do branco foi de $1,3 \times 10^{-1}$ µmol/L, e para o fotômetro "homemade" o limite de detecção calculado com a curva foi de $2,51 \times 10^{-1}$ µmol/L, como pode ser observado o espectrofotômetro Global Analyser consegue detectar a presença de menores concentrações de ozônio.

### 4.1.10 Limite de quantificação (LQ) para ozônio

O limite de quantificação do espectrofotômetro Global Analyser calculado com a curva é de $4,33 \times 10^{-1}$ µmol/L, e para o fotômetro "homemade" é de $8,35 \times 10^{-1}$ µmol/L, como pode ser observado o espectrofotômetro Global Analyser consegue quantificar menores concentrações de ozônio.

### 4.1.11 Teste t-Student para amostras de campo

Conforme discutido nas seções anteriores o fotômetro proposto neste trabalho designado de "homemade" apresentou resultados semelhantes ao espectrofotômetro comercial usado para comparação dos resultados analisando as curvas analíticas. Nesta seção analisa-se também os resultados das amostragens realizadas nos seis locais em Rondonópolis obtidas com sinal analítico dos dois equipamentos.

Os resultados de ambos os equipamentos foram submetidos ao teste t-Student utilizando software Microsoft Excel para fazer os cálculos. Existe a opção para a realização do teste t-Student no Microsoft Excel implementando fórmulas matemáticas em planilhas do Excel, como no exemplo mostrado nas Figuras 41 e 42, porém a opção é mais difícil de ser executada, pois demanda maior conhecimento do Excel e sobre os cálculos relacionados ao teste t-Student.

| | A | B | C | D | F |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Data:05/05/2022 | | | Teste T para NO2 | |
| 2 | Local | Analyser ppb (X1 | Analyser ppb (X1)2 | Homemade ppb (X2) | Homemade ppb (X2)2 |
| 3 | Casa | 1,22 | =B3*B3 | 1,18 | =D3*D3 |
| 4 | Daniel | 1,88 | =B4*B4 | 1,68 | =D4*D4 |
| 5 | Rodo | 4,1 | =B5*B5 | 3,87 | =D5*D5 |
| 6 | Alfredo | 3,25 | =B6*B6 | 2,39 | =D6*D6 |
| 7 | Aldo | 4,52 | =B7*B7 | 3,58 | =D7*D7 |
| 8 | UFR | 2,14 | =B8*B8 | 1,47 | =D8*D8 |
| 9 | ∑ (X1)2 e ∑ (X2)2 | | =C3+C4+C5+C6+C7+C8 | | =F3+F4+F5+F6+F7+F8 |
| 10 | Médias | =MÉDIA(B3:B8) | | =MÉDIA(D3:E8) | |
| 11 | (X1)2 e (X2)2 | =B10*B10 | | =D10*D10 | |
| 12 | Variância | $s^2 = \frac{\sum X^2}{N} - X^2$ | | | |
| 13 | | | | =(F9/B14) -D11 | |
| 14 | n | =CONT.NÚM(B3:B8) | | =CONT.NÚM(D3:E8) | |
| 15 | $s_{X_1-X_2} = \sqrt{\left(\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}\right)\left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 N_2}\right)}$ | | | | |
| 16 | | | | | |
| 17 | | | | | |
| 18 | | | | | |
| 19 | | | | | |
| 20 | =RAIZ((((B14*B12)+(D14*D12))/(B14+D14-2))*((B14+D14)/(B14*D14))) | | | | |
| 21 | $t = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{s_{X_1-X_2}}$ | | | | |
| 22 | | | | | |
| 23 | | | | | |
| 24 | T calculado = =((B10-D10)/A20 | | T critico = | 2,228 | |
| 25 | Analisando T calculado e T crítico | | | | |
| 26 | =SE(B24<D24;"Não há diferença entre as médias !"; "Há diferença significativa entre as médias!") | | | | |

Figura 41:Planilha com fórmulas utilizadas no Excel para teste t -Student.
Fonte: Autor.

| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Data:05/05/2022 | | | Teste T para NO2 | | |
| 2 | Local | Analyser ppb (X1) | Analyser ppb (X1)2 | Homemade ppb (X2) | | Homemade ppb (X2)2 |
| 3 | Casa | 1,22 | 1,49 | 1,18 | | 1,39 |
| 4 | Daniel | 1,88 | 3,53 | 1,68 | | 2,82 |
| 5 | Rodo | 4,10 | 16,81 | 3,87 | | 14,98 |
| 6 | Alfredo | 3,25 | 10,56 | 2,39 | | 5,71 |
| 7 | Aldo | 4,52 | 20,43 | 3,58 | | 12,82 |
| 8 | UFR | 2,14 | 4,58 | 1,47 | | 2,16 |
| 9 | X1)2 e ∑ (X2)2 | | 57,41 | | | 39,88 |
| 10 | Médias | 2,85 | | 2,36 | | |
| 11 | X1)2 e (X2) | 8,13 | | 5,58 | | |
| 12 | Variância | $s^2 = \frac{\sum X^2}{N} - \bar{X}^2$ | 1,44 | | 1,07 | |
| 13 | | | | | | |
| 14 | n | | 6 | | 6 | |
| 15 | $s_{\bar{X}_1-\bar{X}_2} = \sqrt{\left(\frac{N_1 s_1^2 + N_2 s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}\right)\left(\frac{N_1 + N_2}{N_1 N_2}\right)}$ | | | | | |
| 16 | | | | | | |
| 17 | | | | | | |
| 18 | | | | | | |
| 19 | | | | | | |
| 20 | | | 0,708 | | | |
| 21 | $t = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{s_{X_1-X_2}}$ | | | | | |
| 22 | | | | | | |
| 23 | | | | | | |
| 24 | T calcu 0,692 | | T critico = | | 2,228 | |
| 25 | Analisando T calculado e T crítico | | | | | |
| 26 | Não há diferença entre as médias ! | | | | | |

Figura 42:Planilha utilizada no Excel para teste t -Student.
Fonte: Autor.

A segunda opção para o teste t-Student são cálculos automáticos no Microsoft Excel, no anexo 8.1 deste trabalho estão detalhados os passos necessários. Nem sempre o passo 1 está disponivel no Excel então é necessário ativar está opção clicando em: **arquivo, opções, suplementos, ir, ferramentas de análise.**

Na Tabela 13 verifica-se os resultados de teste t-Student calculados de forma automática no Microsoft Excel, para comparar os dados com o espectrofotômetro (Comer) e o fotômetro “homemade” (Home), observa-se que o valor de t- calculado (Stat t) e t tabelado (t crítico bi-caudal) correspondem aos mesmos valores de t -calculado e T crítico 0,6923 e 2,2281 respectivamente mostrados na Figura 42 onde foi realizado cálculos utilizando fórmulas no Excel.

Tabela 13:Resultados de teste t-Student para $NO_2$ para o dia 05/05/2022.

| Local | [ ] ppb | 05/05/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | $NO_2$ | 1,22 | 1,18 | | Comer | Home |
| | | | | Média | 2,8517 | 2,3617 |
| Daniel | | 1,88 | 1,68 | Variância | 1,7227 | 1,2833 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 4,10 | 3,87 | Variância agrupada | 1,503 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,25 | 2,39 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,6923 | |
| Aldo | | 4,52 | 3,58 | P(T<=t) uni-caudal | 0,2523 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 2,14 | 1,47 | P(T<=t) bi-caudal | 0,5045 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

Fonte: Autor.

O objetivo da realização deste teste t-Student foi avaliar se os resultados obtidos são estatisticamente iguais. Os valores de t calculados com o Microsoft Excel de forma automática estão resumidos na Tabela 14, mas os dados completos utilizados para obtenção dos resultado estão no anexo 8.2 deste trabalho, neste também são apresentados os demais dados gerados no software Microsoft Excel.

Analisando os resultados do teste t-Student aplicado aos resultados do espectrofotômetro Analyser e do Fotômetro "homemade" constantes na Tabela 14 verifica-se que não há diferença significativa entre os dois equipamentos com um nível de confiança de 95%, pois o valor de t calculado foi menor que o valor de t tabelado (t crítico bi-caudal) 2,2281 para quase todos os casos com exceção do valor do dia 15/03/2022 para ozônio. Nesta época era o período inicial dos trabalhos com o fotômetro “homemade” e ele passava por ajustes na sua configuração, então existe possibilidade de ter ocorrido algum erro na operação do equipamento.

Tabela 14:Teste t-Student espectrofotômetro Analyser e Fotômetro "Homemade".

| Data | Valores de t crítico bi-caudal | |
|---|---|---|
| | $NO_2$ | ozônio |
| 23/02/2022 | -1,132 | -0,416 |
| 15/03/2022 | 0,144 | 2,482 |
| 30/03/2022 | 0,388 | 0,006 |
| 20/04/2022 | 1,433 | 0,108 |
| 05/05/2022 | 0,692 | 0,319 |
| 25/05/2022 | 0,009 | -0,027 |
| 08/06/2022 | 2,144 | -1,254 |
| 28/06/2022 | -0,108 | -0,173 |
| 14/07/2022 | 0,731 | -0,311 |
| 27/07/2022 | 1,043 | 0,168 |
| 29/08/2022 | -0,285 | -0,148 |
| 11/09/2022 | 0,447 | -0,171 |
| 18/09/2022 | 0,893 | -0,016 |
| 15/10/2022 | 0,575 | -0,511 |
| 05/11/2022 | 1,072 | -0,026 |
| 22/11/2022 | 1,143 | 0,170 |
| 13/12/2022 | 0,965 | -0,021 |

Fonte: Autor.

## 4.2 Considerações sobre o fotômetro “homemade”

Uma limitação do fotômetro “homemade” é que ele não permite selecionar comprimentos de onda específicos para as análises, então é necessário trocar o LED manualmente, LED verde para o $NO_2$ e LED laranja para índigo, que correspondem ao comprimentos de onda aproximado de 550 nm e de 600 nm respectivamente.

Realizar a troca do LED mostrou-se em primeiro momento inviável com o sistema conectado a uma protoboard e cabos jumpers, pois a troca do LED mexe nos circuitos e isso frequentemente desconfigurou o sistema, ocasionando por exemplo mal contato entre os componentes eletrônicos, devido os componentes não estarem soldados.

Para resolver o problema do mal contato a protoboard foi substituída por uma placa de fenolite ilhada, ela permite soldar partes do sistema e com isso reduzir o risco de mal contado. Também se conectou o LED a um potenciômetro linear de 1K, para permitir ajuste na emissão do LED com mais facilidade sem necessidade de mexer nas conexões, na Figura 43 é possível visualizar o novo arranjo.

Figura 43:Fotômetro “homemade” aberto.
Fonte: Autor.

### 4.3 $NO_2$ e ozônio na resolução CONAMA 491/2018

Frequentemente em diversas publicações para expressar concentração de poluentes atmosféricos como $NO_2$ e o ozônio utiliza-se partes por bilhão (ppb), mas a resolução CONAMA 491/2018 utiliza o micrograma por metro cúbico (µg/m$^3$), então é frequente existir dificuldade para realização de comparações de resultados, então neste trabalho foi realizado conversões para facilitar a interpretação.

Para a qualidade do ar ser considerada boa os níveis de $NO_2$ não devem ultrapassar 200 µg/m$^3$, pensando em termos de ppb equivale a aproximadamente 106 ppb, já para o ozônio o limite é 100 µg/m$^3$, aproximadamente 51 ppb.

O tempo de amostragem estabelecido na resolução CONAMA 491/2018 para o $NO_2$ é de uma hora, e para o ozônio 8 horas, mas neste trabalho não foi possível amostragens de 1 hora, somente durante 8 e 24 horas.

### 4.4 Concentrações de $NO_2$ em Rondonópolis intervalos de 24 horas

Nos seis locais analisados conforme mostra a Figura 47, observa-se que normalmente as concentrações de $NO_2$ são maiores na Rodoviária, Escola Alfredo Marien e no Posto de combustíveis Aldo. Esses resultados são compatíveis com as fontes de emissão existentes nos respectivos locais, já que os motores a combustão estão entre as maiores fontes geradoras de NO. Após a emissão o NO é rapidamente oxidado a $NO_2$. Oxidantes, como o ozônio, presentes na atmosfera fazem essa oxidação em cerca de 18 s (Finlayson-Pitts e Pitts 1997). A literatura sugere, portanto,

que o $NO_2$ fica próximo de onde é gerado, e é justamente nestes três locais onde existe a maior quantidade de veículos automotores.

Na Rodoviária é um local com grande fluxo de veículos, está localizada próximo à rodovia BR 163 onde também há grande fluxo de veículos. A escola Alfredo Marien fica no centro de Rondonópolis caracterizada pelo grande fluxo de veículos comuns aos centros comerciais urbanos. Já o posto de combustíveis Aldo além de ter o fluxo natural de veículos em postos de combustíveis fica localizado as margens da rodovia BR 364. No posto existe um amplo estacionamento que serve de ponto de apoio para os caminhões que ficam as vezes estacionados com motores ligados. O posto Aldo está em uma região chamada distrito industrial Vetorasso, então nas suas proximidades existem indústrias que também podem ser fontes de emissão de NO quando utilizam óleo combustível em algum dos seus processos. A cidade é relativamente plana e com insolação na maior parte do tempo o que favorece a dispersão do $NO_2$ e reações fotoquímicas de consumo de $NO_2$.

Embora o $NO_2$ não ter sido amostrado em períodos de 1 hora como estabelece a legislação, como os valores amostrados são bem menores que o limite de 200 µg/m$^3$, (106 ppb) estabelecido pela legislação, eles ajudam a evidenciar que para o poluente $NO_2$ o limite legislado possivelmente não deve estar sendo ultrapassado.

### 4.5 Concentrações de ozônio em Rondonópolis intervalos de 24 horas

A partir do final do mês de agosto de 2022 evidenciou-se aumento da concentração de ozônio nas seis diferentes regiões analisadas em Rondonópolis conforme Figura 48. Este aumento é incompativel com o modelo construido com base nos experimentos desde dezembro de 2021 até o inicio de agosto de 2022. Isto é, emissões de NOx (medidas) e COVs (não medidas) em areas de maior trânsito de veículos e formação de maior concentração de ozônio em áreas da periferia do centro urbano. Este fato sugere mudanças na composição da atmosfera local.

#### 4.5.1 Provável causa do aumento de ozônio em Rondonópolis

De acordo com o modelo de trajetória HYSPLIT (Figura 45), massas de ar que chegaram em Rondonópolis entre agosto e outubro de 2022, passaram por regiões do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás onde estão os biomas Pantanal,

Amazônia e Cerrado, e segundo o INPE (Figura 44), é a mesma época (mês de setembro) que ocorre o pico de queimadas principalmente no Mato Grosso e Goiás.

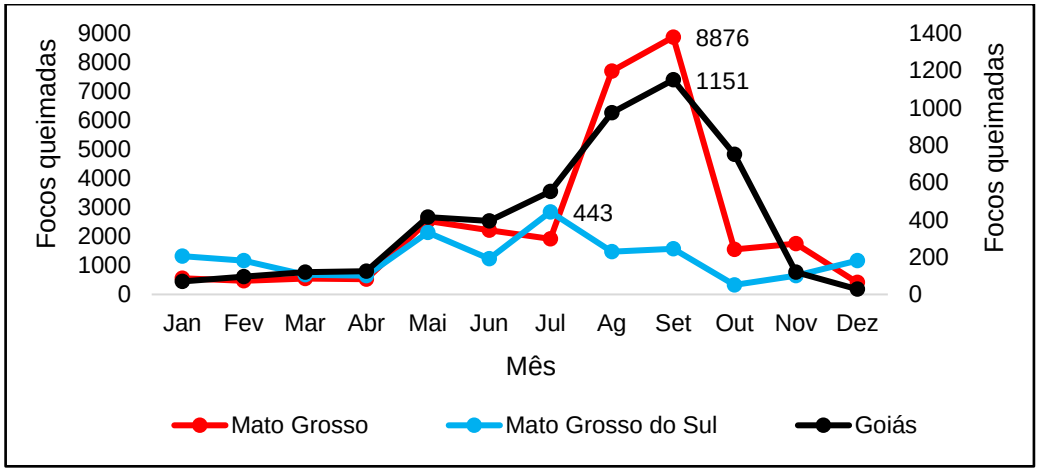


Figura 44:Quantidade de focos queimadas anual.
Fonte: INPE.

A origem das massas de ar que chegaram em Rondonópolis ajudam a reforçar a hipótese de que o aumento de ozônio em Rondonópolis entre agosto e outubro tem relação com as emissões das queimadas.

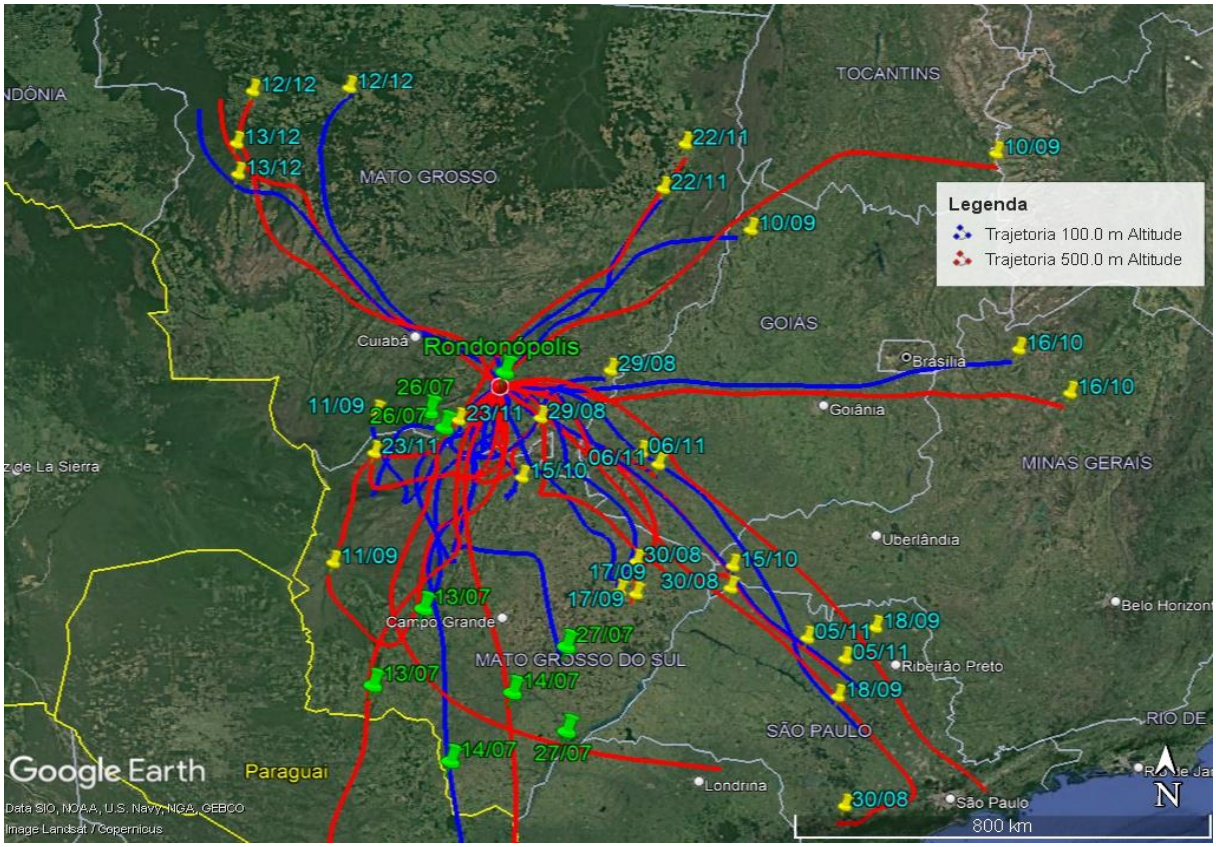


Figura 45:Origem massas de ar Rondonópolis - Modelo de trajetórias Hysplit.
Fonte: (DRAXLER; ROLPH).

O modelo de trajetórias HYSPLIT é geralmente utilizado para avaliar altitudes maiores que cerca de 500m, servindo então para estudos de efeitos regionais da poluição, ou seja, ele é útil para explicar os aumento de poluição em Rondonópolis agosto e outubro. Localmente são ventos superficiais que interferem no deslocamento dos poluentes. A poluição gerada aos poucos vai subindo pela atmosfera até se misturar com as massas de ar.

### 4.5.2 Região de maior concentração de ozônio em Rondonópolis

A concentração de ozônio normalmente é maior na UFR, incialmente pensou-se que teria alguma relação com o fato do local ser bastante arborizado, pois existe possibilidade de árvores liberarem COVs que podem contribuir para formação de ozônio, conforme mostra a Figura 46 em eq. 7 o RH mostrado representa um COV e ele reage na atmosfera com hidroxila e no processo final representado em eq. 9 o $NO_2$ é formado e este está relacionado com a formação de ozônio conforme eq. 3 e 4. Porém acredita-se que as emissões na UFR são muito menores que as esperadas para a frota de veículos em circulação na área central da cidade e nas rodovias no seu entorno. O que parece ser mais provável é que os precursores do ozônio estão sendo gerados em outros locais e chegando na UFR arrastados pelo vento e como sabe-se localmente são ventos superficiais que interferem no deslocamento dos poluentes, diferente do que ocorre ao nível regional em que os poluentes são transportados por massas de ar em altitudes mais elevadas.

Esperava-se maior quantidade de ozônio no posto Aldo devido ele estar em um local com grande fluxo de veículos e teoricamente ter a maior quantidade de COVs na atmosfera devido tratar-se de posto de combustível, e isso não é o que se observa nos dados apresentados na Figura 48. No posto Aldo normalmente é a concentração de $NO_2$ que é mais elevada, denotando que o $NO_2$ ainda não participou no processo de formação de ozônio no local. O processo de mistura dos gases (NOx e COVs), para produzir uma mistura reativa e o início do processo de fotocatálise mediado pelo NOx representado na Figura 46 deve demandar um tempo de dezenas de minutos. Assim a formação do ozônio irá ocorrer em maior intensidade em outras regiões e durante o transporte de $NO_2$ pelo vento originar ozônio.

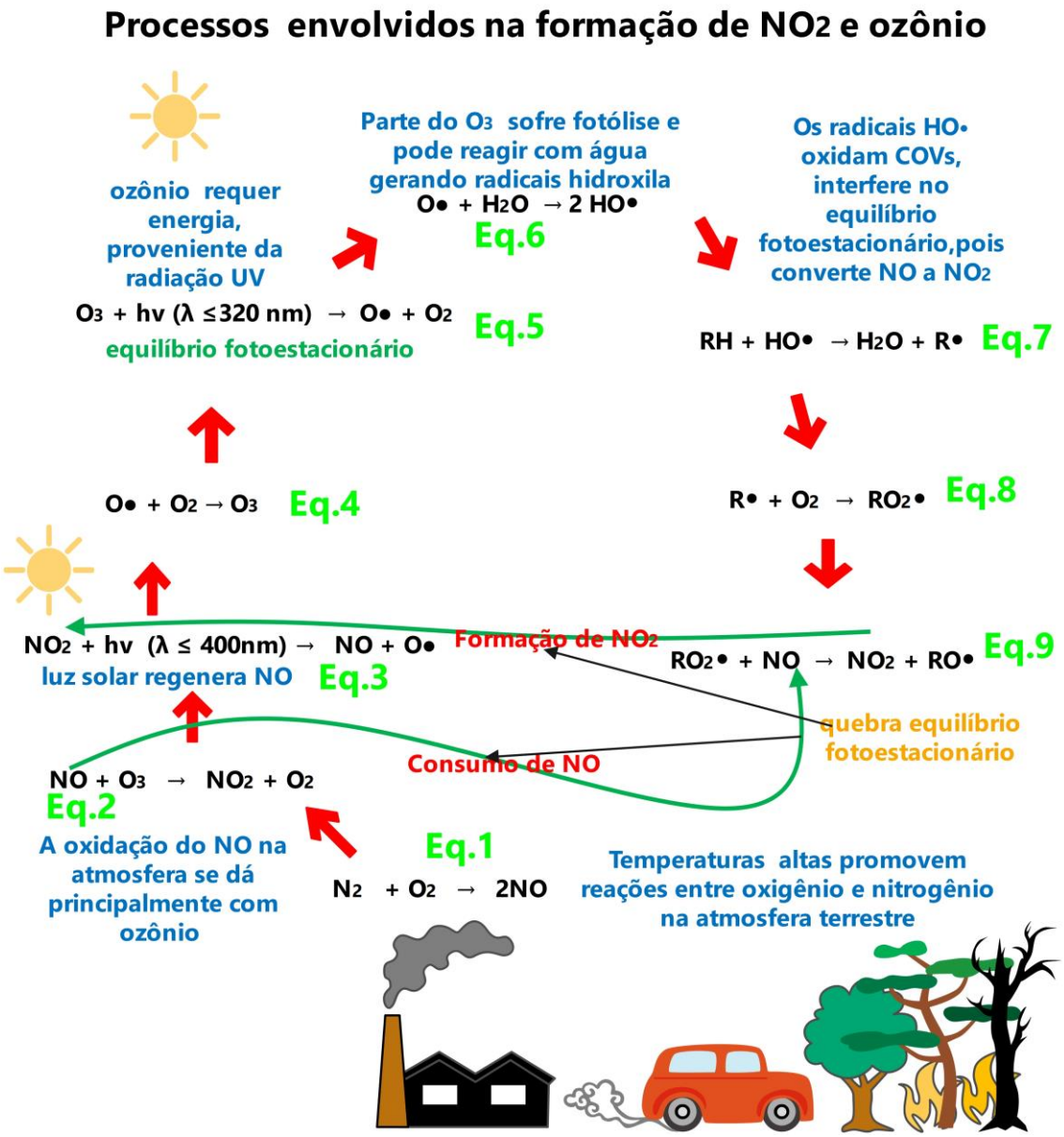


Figura 46:Processos de Formação de $NO_2$ e ozônio.
Fonte: Autor (Construído conforme Rocha; Rosa; Cardoso, 2009).

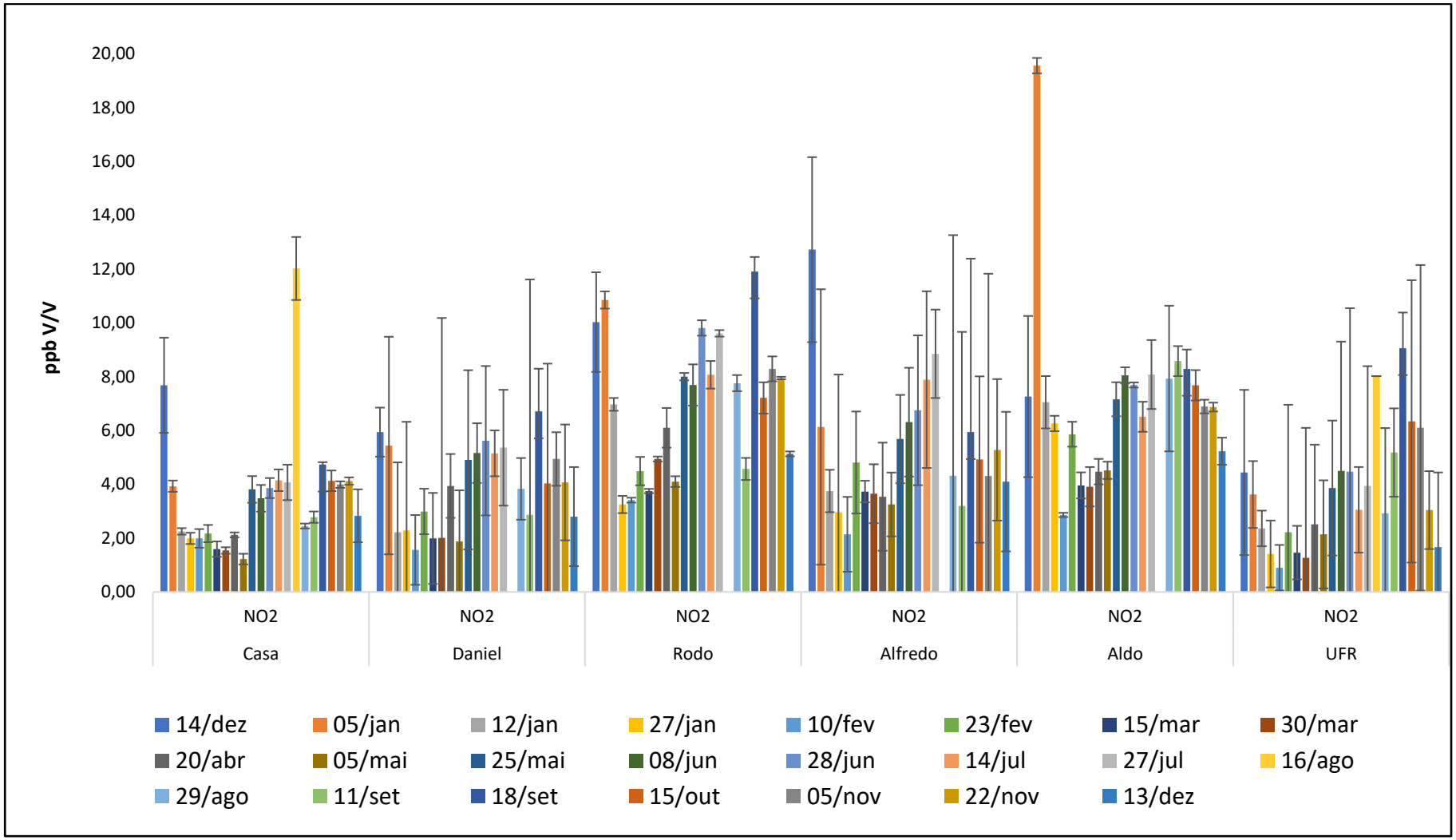


Figura 47:Concentrações de $NO_2$ em Rondonópolis entre 2021 e 2022 (Média 24 horas).
Fonte: Autor.

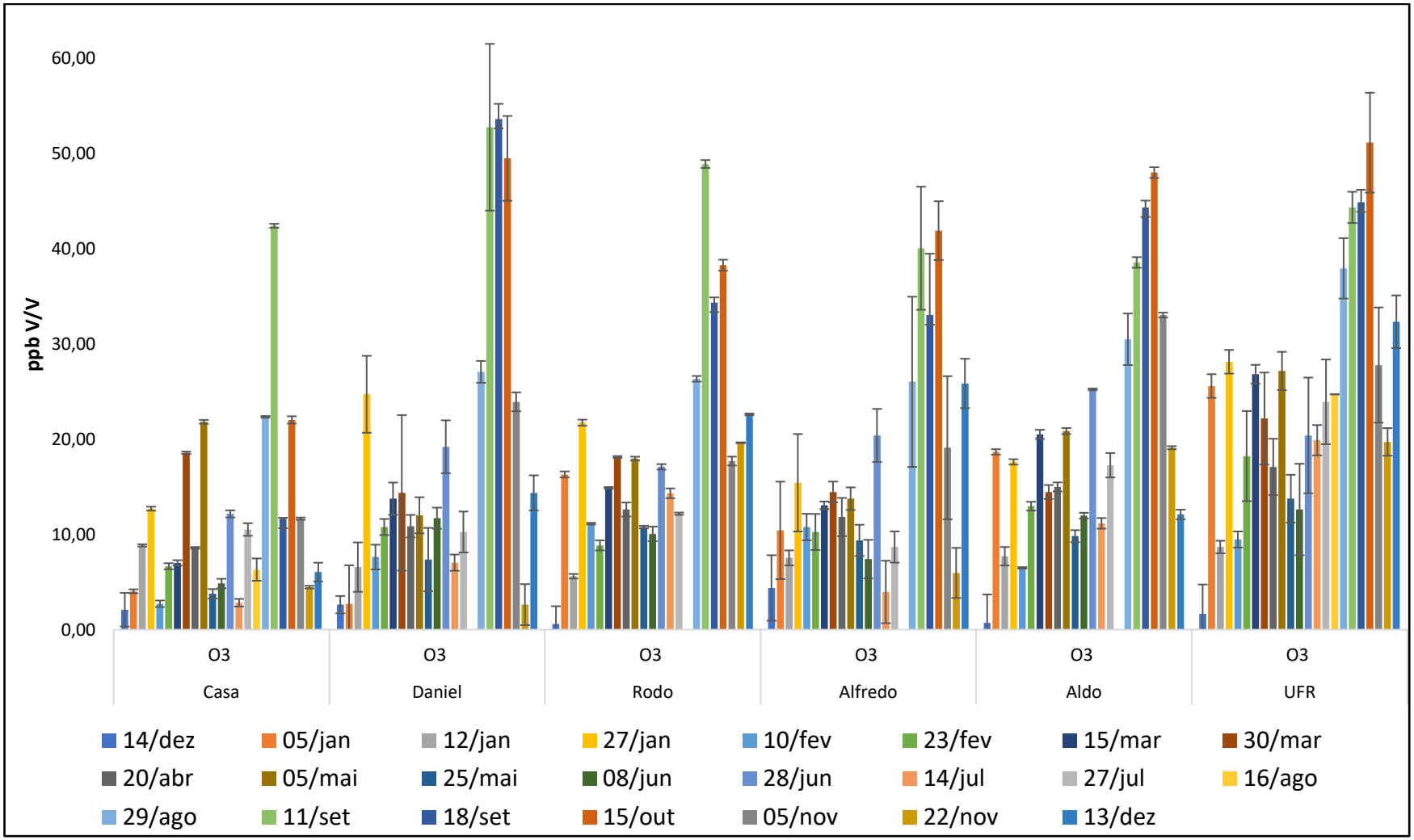


Figura 48:Concentrações de ozônio em Rondonópolis entre 2021 e 2022 (Média 24 horas).
Fonte: Autor.

### 4.5.3 Comparando médias de concentração em intervalos de 8 e 24 horas

A partir de julho foram realizadas amostragens em intervalos de 8 e 24 horas, analisando as Figuras 49 e 50 constata-se que amostragens de 8 horas normalmente as médias de concentrações de poluentes são mais elevadas do que as de 24 horas.

A constatação de que as médias das concentrações de poluentes nas amostragens realizadas em 8 horas são maiores do que as de 24 horas é importante porque as amostragens realizadas neste trabalho constantes nas Figuras 47 e 48 foram realizadas em intervalos de 24 horas. Então é possível que a concentração de poluentes na região analisada foi maior do que o medido nas amostragens de 24 horas. É bem provável que para ozônio em alguns momentos ultrapassariam o limite de 51 ppb estabelecido pela legislação se fossem realizadas amostragens em intervalos de 8 horas, principalmente no período das 6:30 às 14 horas, que segundo os dados da Figura 49 é o horário que ocorre normalmente a maior concentração de ozônio.

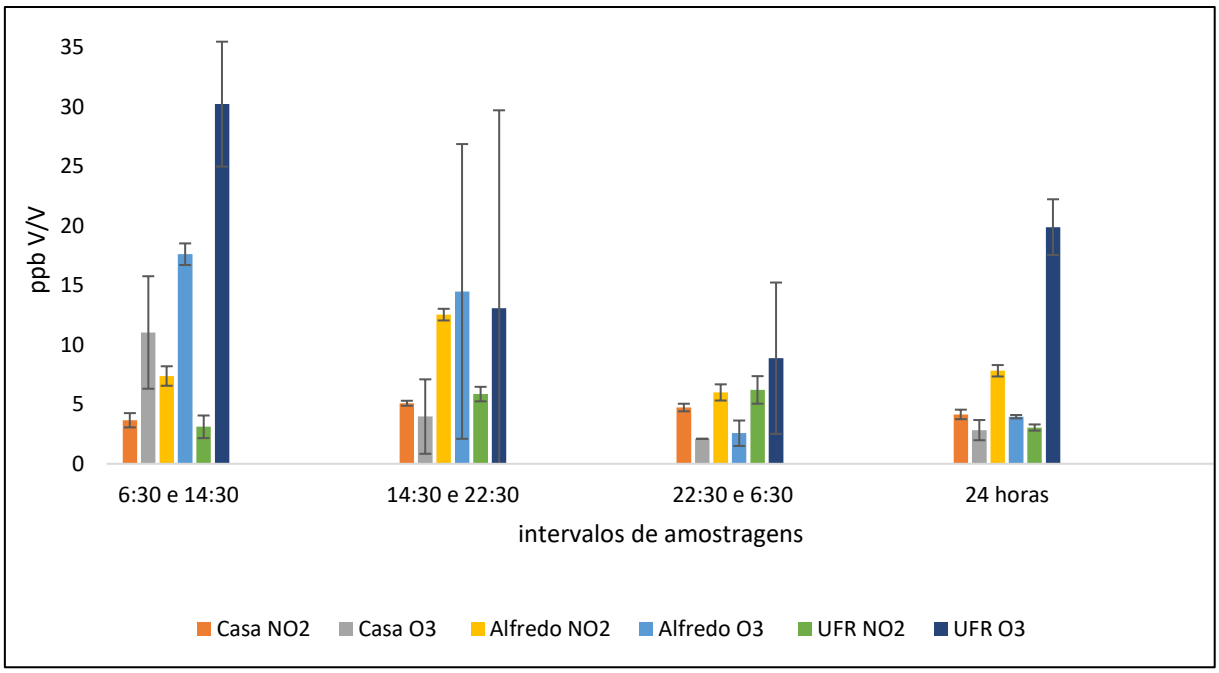


Figura 49:Concentração de $NO_2$ e $O_3$ (Média 8 e 24 horas) em 14/07.
Fonte: Autor.

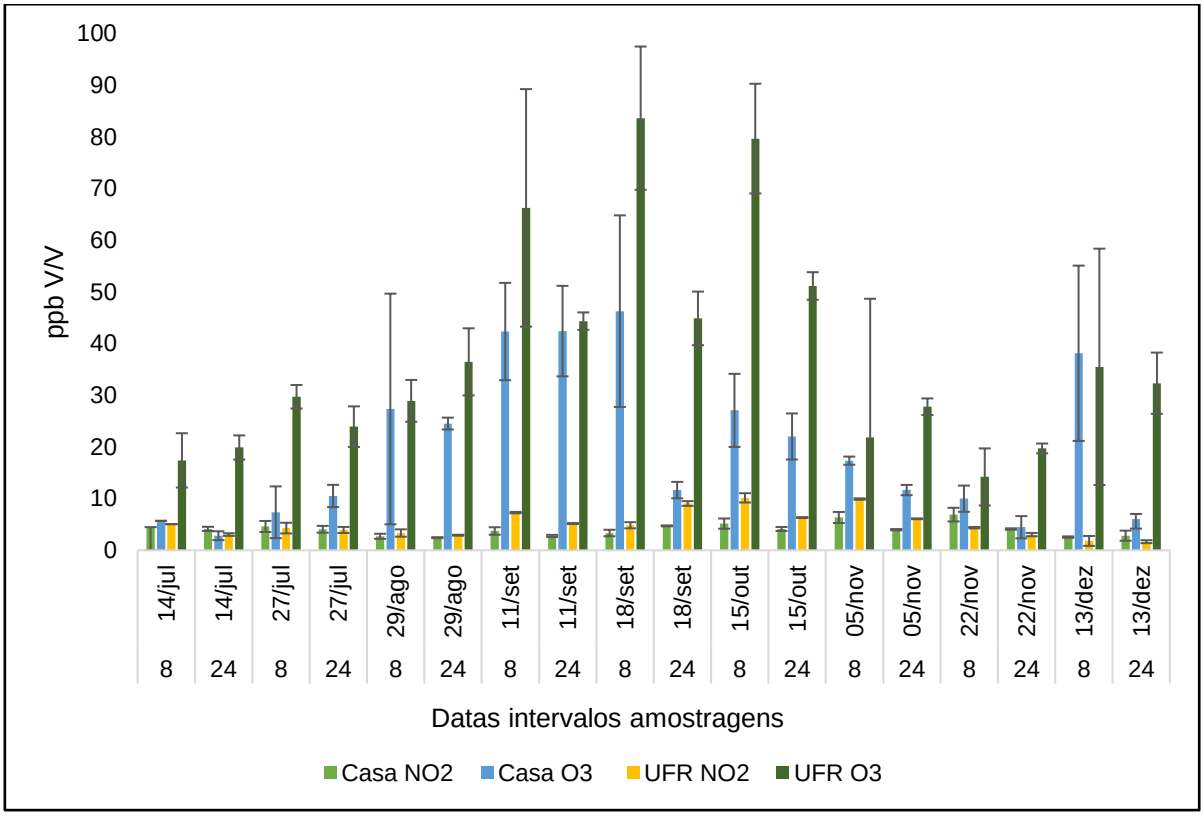


Figura 50:Concentração de $NO_2$ e $O_3$ (Média 8 e 24 horas).
Fonte: Autor.

### 4.5.4 Período do dia e a concentração de $NO_2$ ozônio em Rondonópolis

Em 14 de julho de 2022 foi realizado amostragens de $NO_2$ e ozônio durante 3 vezes seguidas em intervalos de 8 horas, ou seja, durante 24 horas, em três locais em Rondonópolis.

É possível visualizar na Figura 51 que entre o horário das 14:30 e 22:30 horas ocorreu aumento de $NO_2$ principalmente no Alfredo, devido provavelmente a emissão de NO, já que é um local com grande movimentação de veículos por ser área central da cidade, as concentrações de ozônio neste local não são tão elevadas, provavelmente devido ao fato de que o NO pode consumir o ozônio para formar $NO_2$ conforme equação 11.

$$\mathbf{NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2} \text{ (equação 11)}$$

No período entre as 22:30 e 6:30 ocorre diminuição da circulação de veículos, então $NO_2$ diminui, $O_3$ também deve reduzir devido à falta de luz solar, o $NO_2$ existente não produz ozônio, ou seja, a seguinte reação praticamente não ocorre:

$$NO_2 + h\nu\ (\lambda \leq 400\ nm) \rightarrow NO + O\bullet \quad \text{(equação 12)}$$

$$O\bullet + O_2 \rightarrow O_3 \quad \text{(equação 13)}$$

Quanto a concentração de ozônio (Figura 49) ela foi maior na UFR, o pico ocorreu entre as 6:30 e as 14:30 horas, porém não ultrapassou o limite de 51 ppb estabelecido pela legislação CONAMA 491/2018.

Na UFR aparentemente não existe fontes intensas de emissão de NO para produzir ozônio, provavelmente o ozônio é formado a partir de emissões de origem em outra região e é transportado pelo vento.

Em ambos os locais a maior concentração de ozônio ocorreu entre as 6:30 e as 14:30 horas, isso pode ser devido a maior quantidade de luz solar, pois como pode ser observado na Figura 51 essa diminuição nas concentrações de $O_3$ coincidem com períodos de decréscimo da intensidade da luz solar. Porém a via de formação de ozônio deve ser através do $NO_2$, pois o ozônio não absorve luz visível somente radiação UV, então quem deve ser o responsável pelo aumento de ozônio é o $NO_2$ que tem absorção máxima em 400 nm (luz visível) e o ozônio deve ser formado conforme equações 12 e 13.

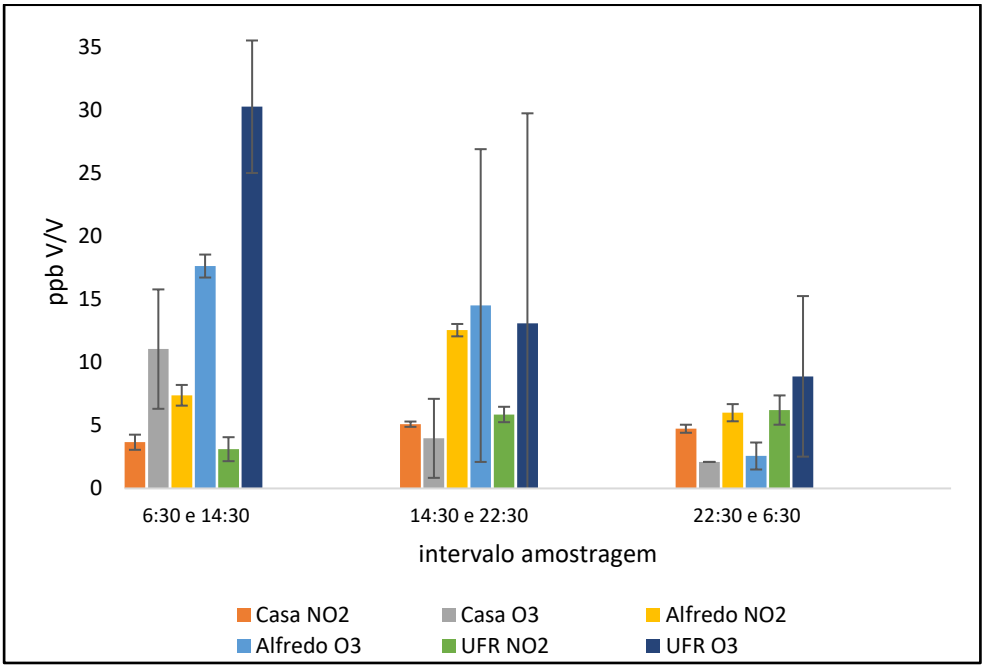


Figura 51:Concentrações de $NO_2$ e $O_3$ em 14 de julho (Média 8 horas).
Fonte: Autor.

### 4.5.5 Influência da radiação solar e da temperatura nas concentrações de ozônio em Rondonópolis

Para analisar a influência da radiação solar e temperatura na concentração de ozônio foi realizado a soma das radiações solares incidentes em cada dia de amostragem e das temperaturas máximas em Rondonópolis, medidas pela estação meteorológica A907 - Rondonópolis – MT. Conforme as Figuras 52 e 53, as maiores incidências de radiação solar e temperaturas elevadas em Rondonópolis foram entre o final do mês de agosto e outubro, é a mesma época que ocorreu o pico na concentração de ozônio, e as maiores quantidades de focos de queimadas nos estados de Mato Grosso e Goiás, ou seja, o aumento da radiação solar e da temperatura estão diretamente relacionados com o aumento das concentrações de ozônio provavelmente devido ao aumento de queimadas nesta época.

Outro fator que pode contribuir para o incremento de ozônio nos períodos de maior incidência de radiação solar além do aumento de queimadas pode ser indicado analisando Spiro e William (2009, p. 160) onde a formação do ozônio requer energia proveniente da radiação UV, mas como ao nível do solo existe baixa quantidade de UV, então a formação de ozônio está relacionada a $NO_2$ que tem absorção máxima em 400 nm, ou seja, absorve luz visível. O $NO_2$ quando excitado é instável se dissocia em NO e O, oxigênio atômico rapidamente reage com $O_2$ originando ozônio, conforme descrito nas equações 12 e 13.

A incidência de maior quantidade de radiação solar provoca maior temperatura, e isso justifica a relação entre o aumento de temperatura e da concentração de ozônio observados na Figura 53.

Para Rocha; Rosa; Cardoso, (2009, p. 106,107) e Spiro e William (2009, p.130,131) o aumento de temperatura favorece a formação do NO na atmosfera, que é ingrediente para formação de $NO_2$ e ozônio, ou seja, nos dias mais quentes ocorre um incremento de ozônio na atmosfera resultado do aumento de $NO_2$. Mas como a temperatura do meio não é tão grande quanto a existente em uma chama durante a queima de biomassa, o aumento da temperatura verificada não deve ser tão relevante para o aumento da poluição atmosférica, mas pode ser um ingrediente a mais. Dessa forma o fator maior temperatura deve contribuir de maneira mais significativa para o aumento da quantidade de queimadas na região, e isso é que deve ser o responsável pelo aumento de ozônio verificado em Rondonópolis.

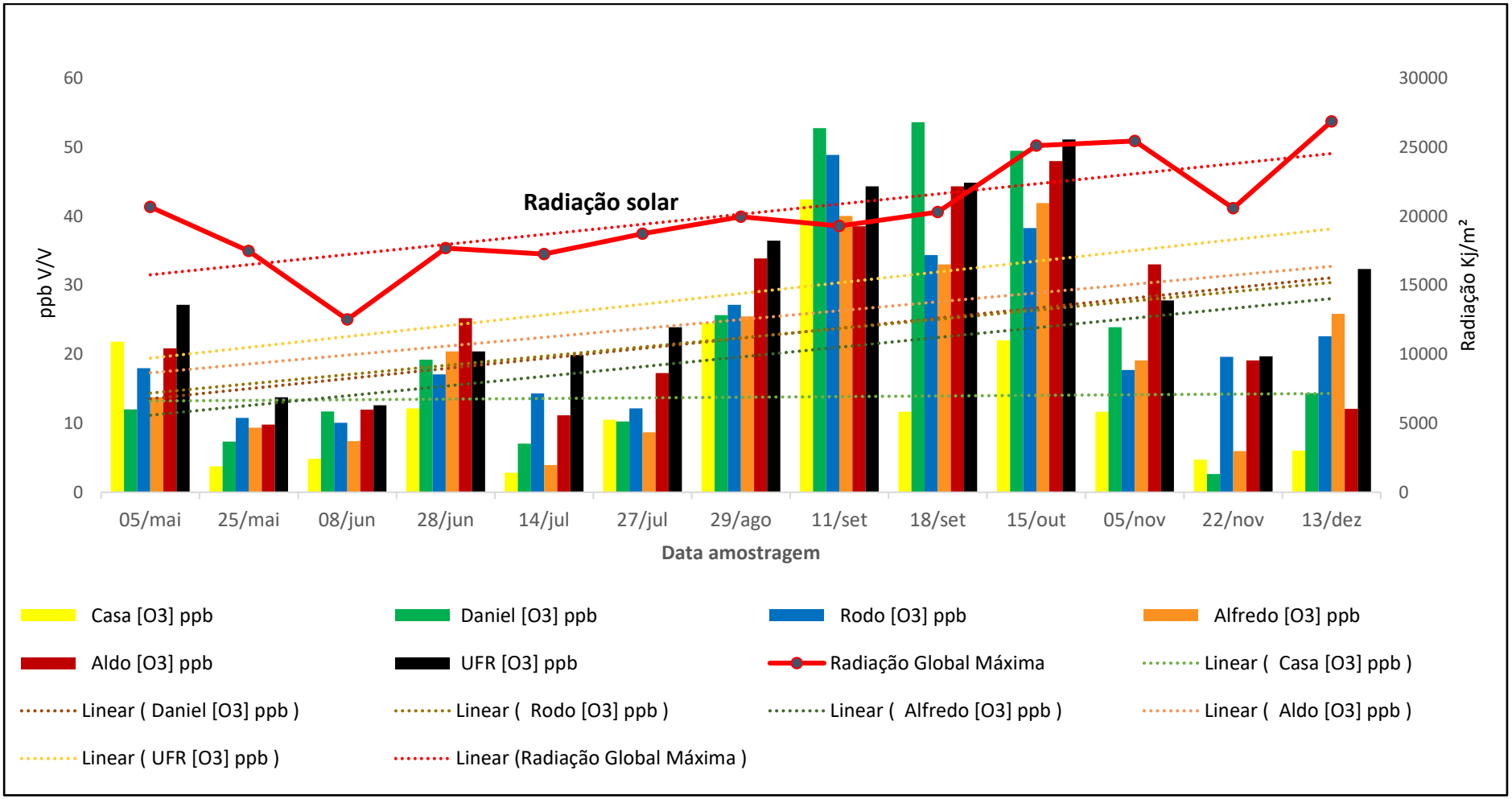


Figura 52:Variações nas concentrações de ozônio x Radiação Solar em Rondonópolis.
Fonte: Autor.

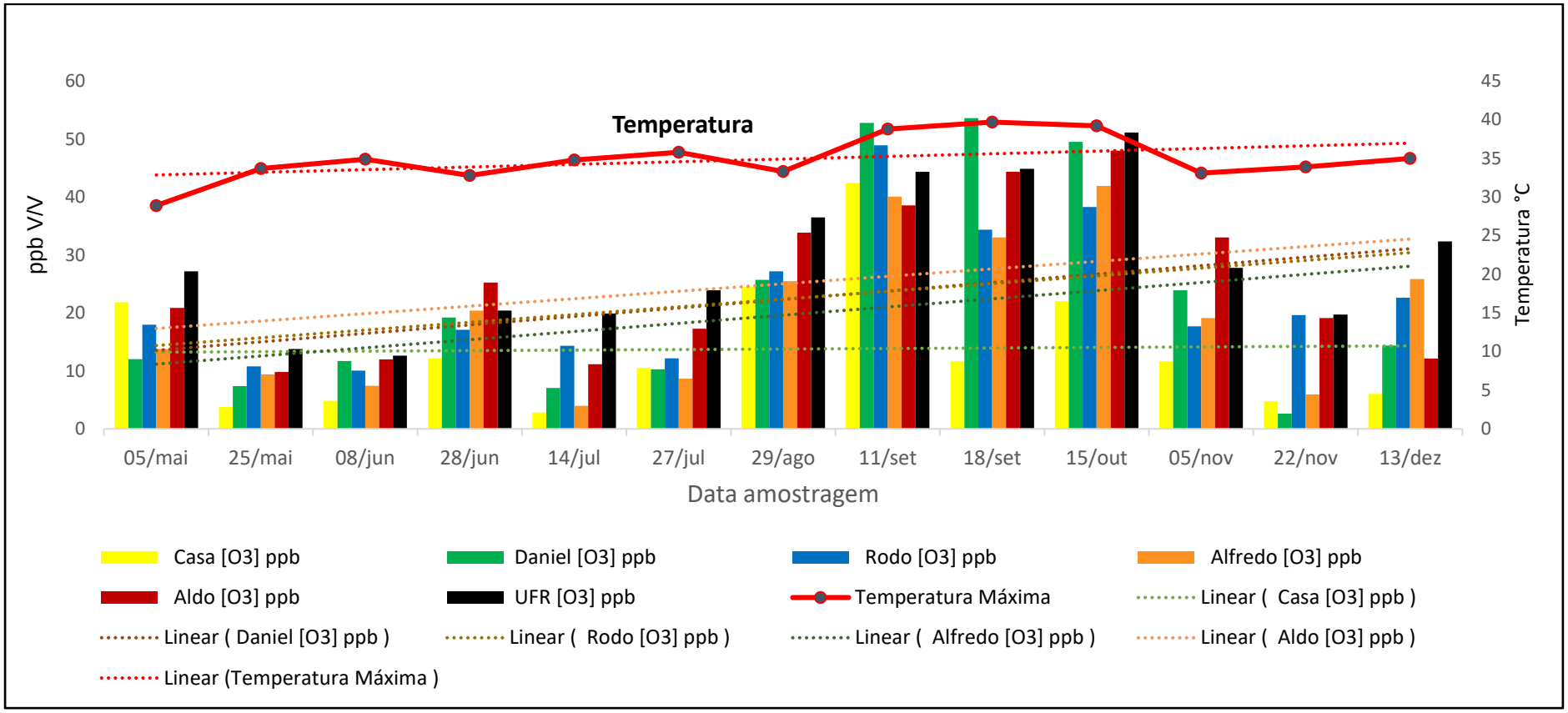


Figura 53:Variações nas concentrações de ozônio x Temperatura em Rondonópolis.
Fonte: Autor.

### 4.6 Importância do Arduino para democratização de tecnologias inovadoras

Na realização deste projeto vieram à tona muitas questões importantes, elas são semelhantes as levantadas por Guardia e Garrigues (2019, p.82,83) eles estão convencidos de que os instrumentos de baixo custo são o ponto de partida de um novo paradigma para química analítica no que se refere a democratização desta ciência.

O Arduino que foi utilizado neste trabalho para construção do fotômetro “homemade” se mostrou uma excelente ferramenta para construção deste tipo de equipamento, devido ao baixo custo, facilidade de operação e robustez e por ser uma ferramenta que contribui para democratização da química analítica e diversas outras áreas importantes para a vida moderna.

Aprender a lidar com Arduino, não somente o hardware, mas todos os três conceitos básicos envolvidos, o hardware que é a placa, o software que é linguagem de programação e o ambiente de desenvolvimento e o último conceito que é comunidade, onde grande número de pessoas compartilham os seus conhecimentos e projetos na internet, disseminando a plataforma Arduino e gerando vantagens para ambos os envolvidos (OLIVEIRA *et al.,*2018, p.13).

Dessa forma o Arduino contribui para a entrada no mundo de criador de tecnologias e não somente consumidor, pois auxilia no desenvolvimento da criatividade e facilita a construção de protótipos, necessários para desenvolvimento de tecnologias inovadoras, inclusive aquelas que serão responsáveis por alavancar a economia global no futuro e ditar o modo de vida das pessoas, como por exemplo a inteligência artificial, robótica e internet das coisas que aparentemente nos próximos anos vai se incorporar ao cotidiano das pessoas, inclusive nos laboratórios de Química Analítica e nas ferramentas que ajudam a mediação do ensino de Química.

Os instrumentos de baixo custo podem propiciar muitos benefícios para sociedade inclusive com sua aplicação em várias outras áreas, incluindo a educacional, principalmente para aquelas situações em que se tenha menos recursos disponíveis para desenvolver por exemplo métodos analíticos caros.

## 5 Conclusões

O projeto aqui apresentado mostrou que é possivel fazer determinação de $NO_2$ e $O_3$ os dois principais poluentes que atuam na atmosfera de cidades sem grandes custos. Não apenas no procedimento de amostragem com os amostradores passivos mas também da deteminação do sinal analitico com o fotômetro "homemade" já que ele apresentou resultados semelhantes a um espectrofotômetro comercial. As caracteristicas do fotômetro "homemade" indicam que ele pode ser utilizado sem levar a amostra ao laboratório podendo o procedimento ser feito em uma ambiente mais simples e com resultados mais rápidos.Os resultados da amostragens realizadas nas diferentes regiões de Rondonópolis são compatíveis com as possíveis fontes de emissão dos precursores $NO_2$ e $O_3$ existentes na cidade. O aumento de ozônio em setembro pode estar relacionado a existência de grande número de incêndios no Cerrado, Pantanal Amazônia no periodo de seca.Os dados médios de ozônio observados a partir de setembro sugerem que os limites de 51 ppb estabelecidos pelos órgãos ambientais de controle da qualidade do ar estão sendo ultrapassados.

## 6 POSSIBILIDADE FUTURA DE TRABALHO:

As alterações feitas na configuração do fotômetro “homemade” ajudaram a melhorar seu desempenho, porém ainda há necessidade de continuar os estudos para testar outras configurações, por exemplo testar analitos que absorvem em comprimentos de ondas diferentes dos que foram testados,LEDs diferentes das que foram utilizadas. Outra questão importante é que as medidas realizadas com o espectrofotômetro foram utilizadas cubetas de vidro, enquanto que para o fotômetro “homemade” foi de plástico, e como sabe-se o tipo de cubeta pode interferir no desempenho do equipamento, então é relevante avaliar o desempenho do sistema utilzando o mesmo tipo de cubeta o que não foi realizado neste trabalho.

O tempo de amostragem estabelecido na resolução CONAMA 491/2018 para o $NO_2$ é de uma hora, mas neste trabalho não foi possível amostragens de 1 hora, somente durante 8 e 24 horas então seria relevante avaliar $NO_2$ em periodos de 1 hora conforme estabelece o CONAMA.

Outra necessidade para complementar este estudo é a realização de medições de $NO_2$ e ozônio por mais tempo, para verificar o comportamento das concentrações destes poluentes em anos que ocorra diminuição e aumento de queimadas nas regiões que foram apontados como causadoras do aumento de ozônio em Rondónoplis.

Ainda levando em consideração que a concentração de compostos orgânicos voláteis interferem na concentração dos poluentes analisados, é relevante medir a concentração destes compostos de forma concomitante ao $NO_2$ e ozônio.

## 7 REFERÊNCIAS


ADAFRUIT. Sensor de luminosidade TSL2561. 2012.Disponível em:<https://learn.adafruit.com/tsl2561> Acesso em: 29/07/2022.

ARDUINO. O que é Arduino? 2021.Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/about.> Acesso em: 29/07/2022.

AVNERY, S. et al. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O3 pollution. Atmospheric Environment. v. 45. p. 2297-2309. 2011. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231011000070> Acesso:01/04/2022.

BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental. 4ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 2011.

Bader, H.; Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method,Water Research.V.15, 1981,p. 449-456. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135481900543#!> Acesso em: 22/07/ 2022.

BULBOVAS, P. et al. Plântulas de soja 'Tracajá' expostas ao ozônio sob condições controladas. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília. v.42. nº 5. p.641-646. maio 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/tCCz9mDt8sxKjB4xn7jTVFy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em:13/06/2022.

BULBOVAS, P. et al. Avaliação da sensibilidade de plantas jovens de quiabo (Abelmoschus esculentus (L.) Moench. - Malvaceae) ao ozônio. Hoehnea. v.35. nº 3. p. 359-366. 2008. Disponível em:< https://www.scielo.br/j/hoehnea/a/L7Tv38Hm59fCD8THqdzqgGw/?format=pdf&lang=pt>Acesso: 24/03/2022.

BRAGA, B. et al. Introdução à Engenharia Ambiental. 2ª ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Padrões de Qualidade do Ar. Disponível em: < https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 17/ 07/ 2022.

CLIMATE DATA. Dados climatológicos para Rondonópolis. Disponível em:< https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/mato-grosso/rondonopolis-31805/> Acesso:02/03/2022.

CHRISTOPHERSON, R. W.; BIRKELAND, G. H. Geossistemas: uma introdução à geografia física. [recurso eletrônico] 9ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2017. Disponível em:< https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582604441/pageid/1 Acesso: 31/08/2023.

CONAMA. Resolução no 491/18 de 18 de novembro de 2018; Brasil, 2018.

CRESPO, A. A.; Estatística / Antônio Arnot Crespo. 20. ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2020. 256 p.

CRUZ, L. P. dos S.; CAMPOS, V. P. Amostragem passiva de poluentes atmosféricos. aplicação ao so2. Química Nova. v. 25, nº. 3. 406-411. 2002. Disponível em:< http://old.scielo.br/pdf/qn/v25n3/9334.pdf> Acesso: 16/05/2022.

CRUZ, F. N. da; BORBA, G. L.; ABREU, L. R. D. de. Ciências da natureza e realidade: interdisciplinar. Natal, RN: EDUFRN Editora da UFRN, 2005. Disponível em:http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia_PAR_UAB/Fasciculos%20-20Material/Ciencia_Natureza_Realidade/CI_NAT_A10_GR_RAARL_090810.pdf Acessado:07/04/2022.

DERISIO, J. C.; Introdução ao controle de poluição ambiental. 4. ed atual. - São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

DETRAN MT. Departamento Estadual de Trânsito do Mato Grosso. Demonstrativo da frota de veículos por tipo - dezembro/2020.Disponível em: <https://www.detran.mt.gov.br/documents/9895421/13735034/Frota+por+tipo+-+dezembro+2020/020c544b-0bc0-f172-c6b9-83d348dcfab8> Acesso em: 11/02/2021.

DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model Access via the NOAA ARL READY Website. Disponível em: < https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive.> Acesso em 08/02/2023.

GAIÃO, E. da N. et al. Um fotômetro multi-led microcontrolado, portátil e de baixo custo. Química Nova. v. 28. n. 6. 2005 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/TBky9384MrgMZxfJmNnCKgC/?format=pdf&lang=pt> Acesso 01/04 2022.

GARCIA, G.; ALLEN, A. G.; CARDOSO, A. A. A New and Simple Visual Technique Based on Indigo Dye for Determination of Ozone in Ambient Air. Water Air Soil Pollut 225. 1836 .2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-013-1836-2#citeas > Acesso 05/04/2022.

GARCIA, G. Construção e calibração de amostrador passivo para determinação de ozônio troposférico. 2009. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/97808> Acesso: 05/04/2022.

GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, F. S.; BARLETTE, V. E. Um medidor de luminosidade com módulo sensor integrado e aquisição automática de dados com aplicações didáticas. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 41. n. 3 .2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/VxcxgDHbZ7PTTBTd9mSxWDG/?format=pdf&lang=pt >Acesso 04/04/2022.

GUARDIA, M.; GARRIGUES, S. Analytical Research Based on the Use of Low Cost Instrumentation. Pharmaceutical Sciences. 25. 82-84. 10.15171/PS.2019.13.Disponível:< https://www.researchgate.net/publication/334540354_Analytical_Research_Based_on_the_Use_of_Low_Cost_Instrumentation> Acesso:13/01/2023.

HAGE, D. S.; CARR, J. D. Química analítica e análise quantitativa. 1ª Ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

HARRIS, D. C. Análise química quantitativa. 8ª Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa. Frota de Veículos Ano 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/rondonopolis/pesquisa/22/0?ano=2010> Acesso em: 11/02/2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa. População. Disponível em: < https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/rondonopolis/panorama > Acesso em: 11/02/2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Monitoramento dos Focos Ativos por Estado. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/ >Acesso em: 08/02/2023.

KRUPA, S.V.; LEGGE, A. H. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. Environmental Pollution. v.107. p.31–45. 2000. Disponível em:< https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749199001542#!> Acesso em: 03/04/2022.

LEANDRO, D. da S.; ANGEOLETTO, F. Poluição atmosférica em cidades médias: uma proposta de avaliação para Rondonópolis-MT. Revista Espaço Acadêmico. ano 17. nº 198. p. 122-130. novembro, 2017.Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/EspacoAcademico/article/view/35362/21004 >Acesso em: 09/02/2021.

LEITE, M. A. P. Fotômetro portátil de baixo custo: experimentação e contextualização no ensino de química da educação básica. 2014. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática). Centro de Educação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014. Disponível em: < http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/5356/1/Fot%c3%b4metro%20port%c3%a1til%20de%20baixo%20custo%3a%20experimenta%c3%a7%c3%a3o%20e%20contextualiza%c3%a7%c3%a3o%20no%20ensino%20de%20qu%c3%admica%20da%20educa%c3%a7%c3%a3o%20b%c3%a1sica.pdf >Acesso 21/07/2022.

LI, J. et al. Atmospheric ozone measurement with an inexpensive and fully automated porous tube collector-colorimeter.Talanta,V. 74, 2008,p.958-964.Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914007005401?via%3Dihub> Acesso em: 22/07/ 2022.

LIMA, M. A. de; CABRAL, O. M. R.; GONZALES MIGUEZ, J. D. Mudanças climáticas globais, e a agropecuária brasileira. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001.

LIMA, M. J. A.; FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Aplicações e implicações do ozônio na indústria, ambiente e saúde. Química Nova. v. 44, n. 09. p. 1151-1158. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/C8CDZCz4tnLqVr6Hr8LsYsd/?format=pdf&lang=pt>.Acesso em: 02/04/2022.

LODGE, James P. Methods of Air Sampling and Analysis. 3. ed. -. Chelsea: Lewis: Intersociety Committee, 1989.

LOVELOCK, J. E., Crispin. Tickell, and Ivo Korytowski. A vingança de Gaia. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2006.

LÜHMANN, Â. C. de O.; OLIVEIRA, C. L. V. O Fantástico Mundo do Arduino. Salvador: Asè Editorial, 2016.

MACHADO, C. M. D. ; CARDOSO A. A.; ALLEN A. G. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 2, 381–385. Disponível em:< doi.org/10.1021/es070384u>Acesso em: 21/07/2023

MANAHAN, S. E. Química ambiental. 9ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 2013.

MANAHAN, S. E. Environmental chemistry. 10ª Ed., New York: CRC Press, 2017.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, Tiziano; MORAES, M. R. de; Meteorologia e poluição atmosférica. Ambiente & Sociedade; Campinas v. XI, n. 1; p. 1-13; jan.-jun. 2008.

MOZETO, A. A. Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. Cadernos temáticos de química nova na escola, São Paulo, n. 1, p.41-49, maio 2001. Edição especial. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/atmosfera.pdf> Acesso em: 02/04 2022.

OECD. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. 2016. The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution. OECD Publishing, Paris. Disponível em:< https://doi.org/10.1787/9789264257474-en> Acesso em:31/03/2022.

OLIVEIRA, C. L. V.; ZANETTI, H. A. P. Arduino descomplicado - Como elaborar projetos de eletrônica. São Paulo; Érica,2015.
OLIVEIRA, C. L. V. et al. Aprenda Arduino – Uma abordagem prática. Duque de Caixas: Katzen Editora, 2018.

OLIVEIRA, PAULO C. C.; LEITE, M. A. P. Espectrofotometria no Ensino Médio: Construção de um Fotômetro de Baixo Custo e Fácil Aquisição. Química Nova na Escola. v.38, nº 2. 181-184. 2016. Disponível em: < http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38_2/13-EEQ-58-14.pdf> Acesso em: 03/04 2022.

OMS. Organização Mundial da Saúde. Ambient (outdoor) air pollution. OMS, 22 de setembro de 2021. Disponível em:<https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health> Acesso: 03/03/2022.

OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde. Novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS visam salvar milhões de vidas da poluição atmosférica .22 Set 2021.Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da>Acesso:02/04/2022.

OPENAI.ChatGPT. Disponível em: < https://chat.openai.com/chat> Acesso:09/04/2023.

OPENAI. Sobre. Disponível em:< https://openai.com/about>Acesso:09/04/2023

PASSARETTI FILHO, J. Análise de imagens para fins analíticos: aplicações ambientais e tecnológicas. 2015. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/143007>Acesso 05/04/2022.

PETRUCI, J. F. da S. et al. Analytical methods applied for ozone gas detection: A review. Trac-trends in analytical chemistry. v. 149. p. 116552. 2022. Disponível em:< https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993622000358>Acesso em: 03/04 2022.

PRESBITERIS, R. J. B. de. Princípios de química ambiental. Curitiba: InterSaberes, 2021
.
ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. Introdução à Química Ambiental. 2ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 2009.

RAPOSO, A.; ASSIS, W. L. de; NORTON, S. R. Revisão bibliográfica dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde humana e uma breve análise crítica da atual legislação brasileira sobre os padrões de qualidade do ar (CONAMA 491/2018). Cadernos do Leste, v. 21, nº 21, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/caderleste/article/view/35677> Acesso em: 17/ 07/ 2022.

ROCHA, C. G. da. Desenvolvimento, calibração e aplicação de novas metodologias analíticas para medidas das emissões de amônia e óxidos de nitrogênio provenientes do solo adubado. 2021. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2021.
Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/213681> Acesso: 17/07/2022.

SKOOG, D. A. et al. Fundamentos de química analítica. 8ª Ed., São Paulo: Cengage Learning, 2006.

SCHIRMER, W. N. ; LISBOA, H. de M. Química da atmosfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações. TECNO-LÓGICA. v. 12 n. 2. p. 37-46. jul./dez. 2008. Disponível em: < https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/563> Acesso em: 02/04 2022.

SILVA, C. M. da; ARBILLA, G. Urbanização e os Desafios na Caracterização da Qualidade do Ar. Revista Virtual de Química. Vol. 10. Nº. 6.1898-1914. Janeiro de 2019. Disponível em: < http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v10n6a13.pdf> Acesso em: 02/04/ 2022.

SPIRO, T.G.; STIGLIANI, W. M. Química ambiental. 2ª ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SOUZA, P. A. F.; FRANCISCO, K. C. A.; CARDOSO, A. A. Desenvolvimento de amostrador passivo sensível para monitoramento de poluição atmosférica por dióxido de nitrogênio. Química Nova, 40(10), 1233-1237. 2017. Disponível em: < http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/NT20170137.pdf>Acesso em 10/02/2021.

UGUCIONE, C.; NETO, J. de A. G.; CARDOSO, A.A. Método colorimétrico para determinação de dióxido de nitrogênio atmosférico com preconcentração em coluna de c-18. Química Nova. v. 25. nº 3. p. 353-357.2002. Disponível em:< https://www.scielo.br/j/qn/a/ybFKYGZBfWKZ9mgsq4qxsfp/?format=pdf&lang=pt> Acesso em:24/03/2022.

SETTE, D. M. Os climas do cerrado do Centro-Oeste. Revista Brasileira de Climatologia, Vol. 1, Nº 1. 2005.Disponível em: < https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25225/16924 >Acesso:12/08/2022.

SILVA, C. M. da et al. Modelos fotoquímicos simples como ferramenta para o gerenciamento da qualidade do ar. Química Nova. V. 42, Nº. 3, 273-282, 2019. Disponível em: < https://www.scielo.br/j/qn/a/zYs7z3NC7VRpVgz4TpgMJpC/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 21/07/ 2022.

SILVA, J. G. da; Controle da poluição atmosférica: livro didático .1. ed. rev. – Palhoça: UnisulVirtual, 2011.

VOGEL, A. I.; Análise química quantitativa; tradução Júlio Carlos Afonso, Paula Fernandes de Aguiar, Ricardo Bicca de Alencastro. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2022.
Disponível em: < https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2580-3/epubcfi/6/10[%3Bvnd.vst.idref%3Dcopyright]!/4/18/3:17[%C3%A1fi%2Cca] >. Acesso em: 21 jan. 2023.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V.; Atmospheric Science: an Introductory Survey. 2nd Edition. N.p., 2006. Web

# 8 Anexos

## Anexo 8.1 Passos para realização do teste t-Student no Microsoft Excel

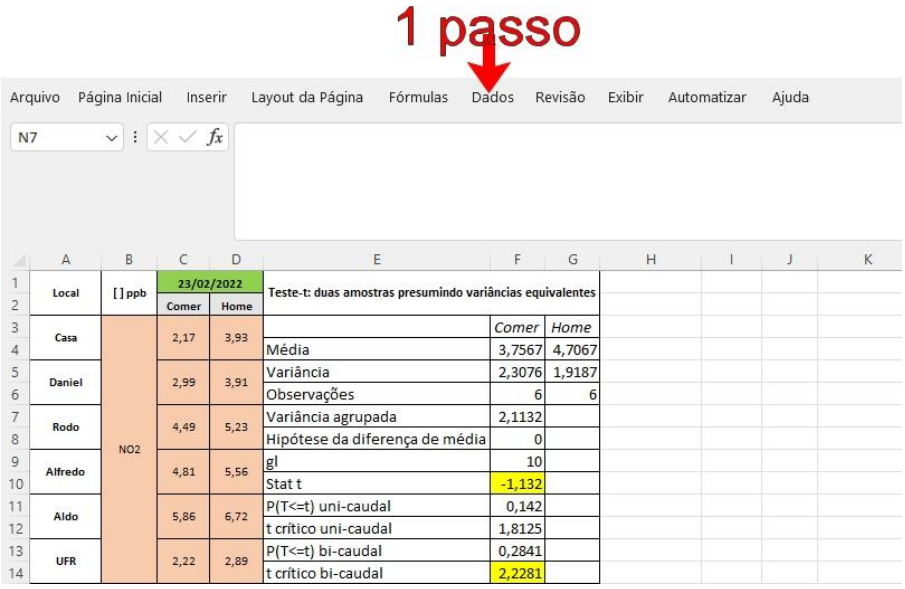


Figura 54:Passo 1 para realizar teste t no Excel
Fonte: Autor

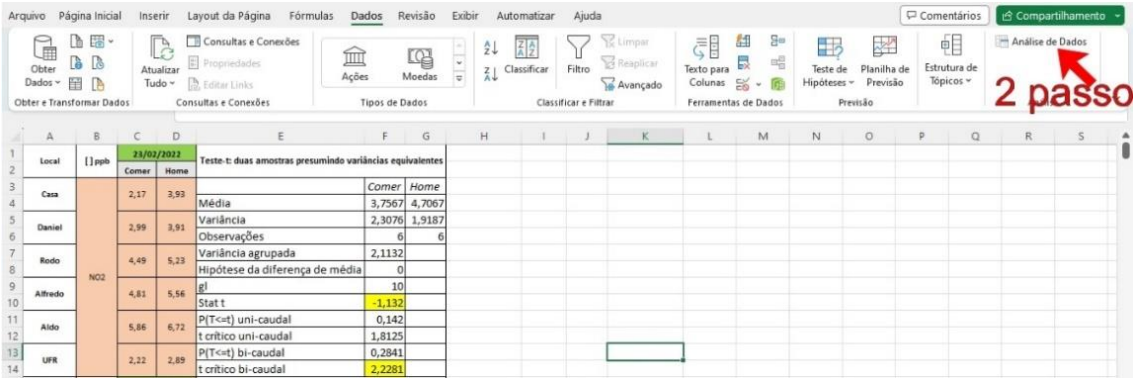


Figura 55:Passo 2 para realizar teste t no Excel
Fonte: Autor

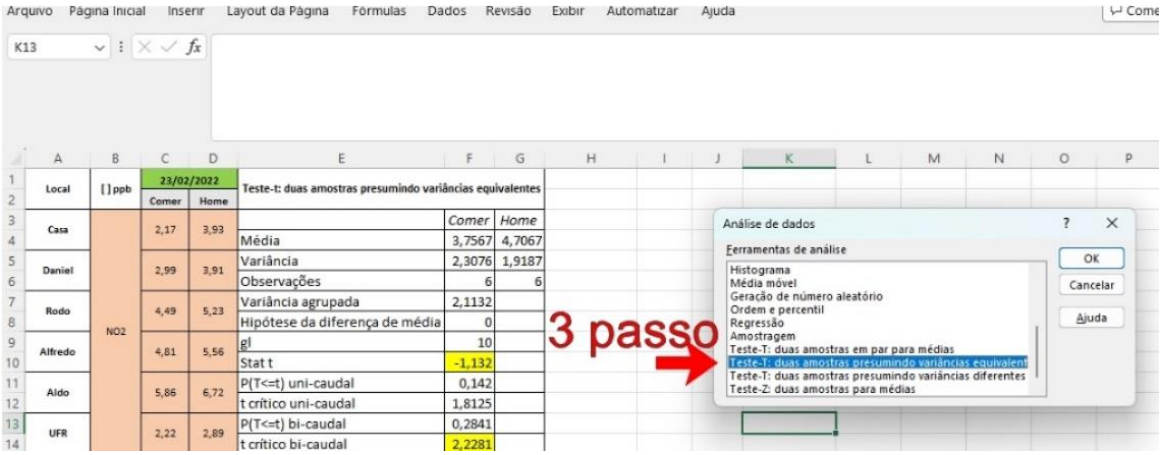


Figura 56:Passo 3 para realizar teste t no Excel
Fonte: Autor

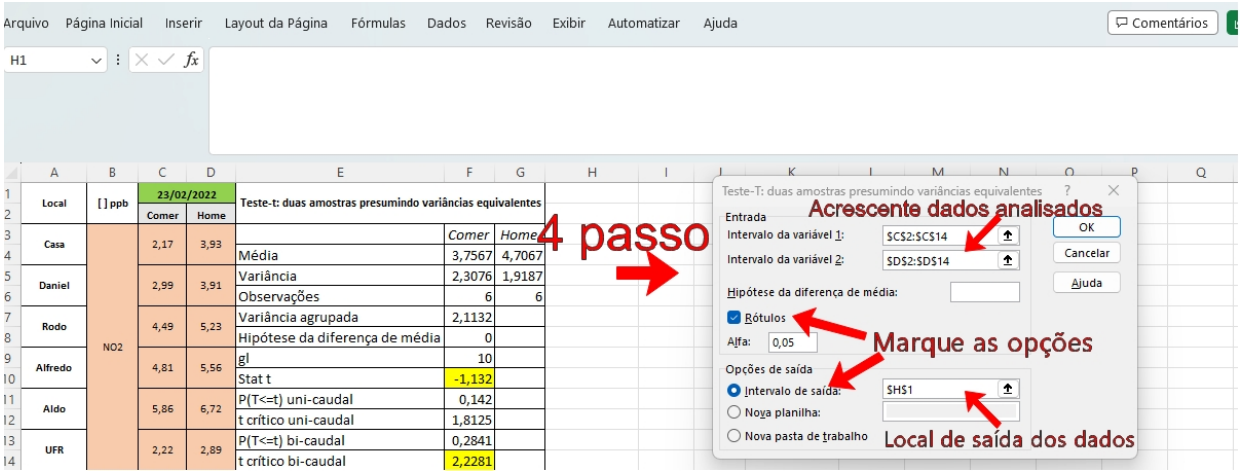


Figura 57:Passo 4 para realizar teste t no Excel
Fonte: Autor

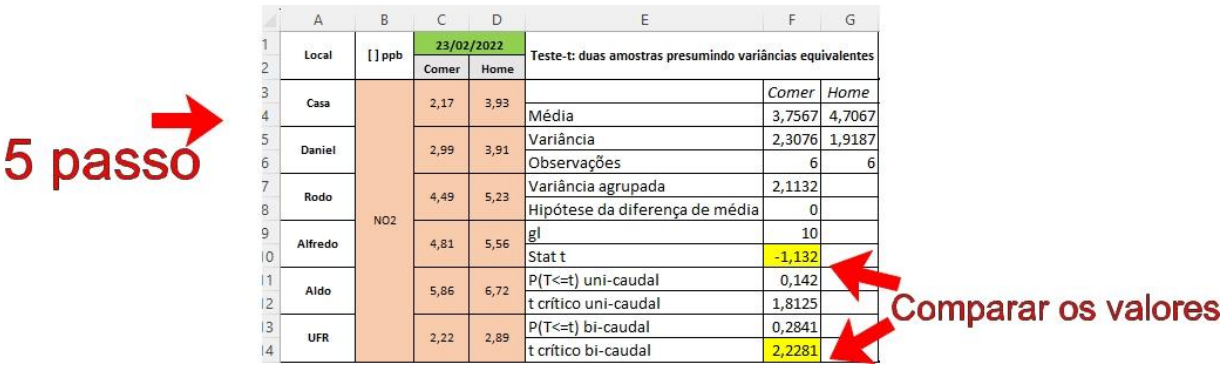


Figura 58:Passo 5 para realizar teste t no Excel
Fonte: Autor

## Anexo 8.2 Planilhas com dados de teste t-Student realizado

| Local | [ ] ppb | 23/02/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 2,17 | 3,93 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 3,7567 | 4,7067 |
| Daniel | | 2,99 | 3,91 | Variância | 2,3076 | 1,9187 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 4,49 | 5,23 | Variância agrupada | 2,1132 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 4,81 | 5,56 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -1,132 | |
| Aldo | | 5,86 | 6,72 | P(T<=t) uni-caudal | 0,142 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 2,22 | 2,89 | P(T<=t) bi-caudal | 0,2841 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 15/03/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 1,59 | 1,73 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 2,7467 | 2,6342 |
| Daniel | | 1,99 | 1,98 | Variância | 1,4023 | 2,2431 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 3,75 | 2,83 | Variância agrupada | 1,8227 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,73 | 2,58 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,1443 | |
| Aldo | | 3,96 | 5,45 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4441 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 1,46 | 1,22 | P(T<=t) bi-caudal | 0,8881 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 30/03/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 1,54 | 1,52 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 2,8867 | 2,5733 |
| Daniel | | 2,01 | 1,80 | Variância | 2,2083 | 1,6977 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 4,94 | 4,44 | Variância agrupada | 1,953 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,65 | 3,13 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,3883 | |
| Aldo | | 3,91 | 3,46 | P(T<=t) uni-caudal | 0,353 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 1,27 | 1,09 | P(T<=t) bi-caudal | 0,7059 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |
| Local | [ ] ppb | 20/04/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 2,12 | 1,32 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 3,78 | 2,6283 |
| Daniel | | 3,94 | 2,59 | Variância | 2,062 | 1,8121 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 6,10 | 4,88 | Variância agrupada | 1,9371 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,54 | 2,38 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 1,4332 | |
| Aldo | | 4,47 | 3,30 | P(T<=t) uni-caudal | 0,0912 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 2,51 | 1,30 | P(T<=t) bi-caudal | 0,1823 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 05/05/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 1,22 | 1,18 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 2,8517 | 2,3617 |
| Daniel | | 1,88 | 1,68 | Variância | 1,7227 | 1,2833 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 4,10 | 3,87 | Variância agrupada | 1,503 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,25 | 2,39 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,6923 | |
| Aldo | | 4,52 | 3,58 | P(T<=t) uni-caudal | 0,2523 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 2,14 | 1,47 | P(T<=t) bi-caudal | 0,5045 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 25/05/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 3,81 | 4,25 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 5,57 | 5,5617 |
| Daniel | | 4,91 | 5,10 | Variância | 2,9805 | 1,9729 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 8,00 | 7,74 | Variância agrupada | 2,4767 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 5,68 | 5,57 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,0092 | |
| Aldo | | 7,16 | 6,60 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4964 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 3,86 | 4,11 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9929 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 08/06/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 3,48 | 2,60 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 5,865 | 3,9467 |
| Daniel | | 5,16 | 3,12 | Variância | 3,2703 | 1,534 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 7,69 | 4,86 | Variância agrupada | 2,4021 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 6,31 | 4,56 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 2,1438 | |
| Aldo | | 8,05 | 5,64 | P(T<=t) uni-caudal | 0,0288 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 4,50 | 2,90 | P(T<=t) bi-caudal | 0,0577 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 28/06/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 3,86 | 4,16 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 6,3667 | 6,5033 |
| Daniel | | 5,62 | 6,07 | Variância | 4,8386 | 4,7124 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 9,81 | 10,00 | Variância agrupada | 4,7755 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 6,75 | 6,71 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,108 | |
| Aldo | | 7,69 | 7,65 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4579 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 4,47 | 4,43 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9159 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 14/07/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 4,15 | 3,47 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 5,8033 | 4,9867 |
| Daniel | | 5,15 | 4,34 | Variância | 4,1465 | 3,3459 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 8,07 | 7,23 | Variância agrupada | 3,7462 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 7,89 | 6,67 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,7308 | |
| Aldo | | 6,51 | 5,62 | P(T<=t) uni-caudal | 0,2408 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 3,05 | 2,59 | P(T<=t) bi-caudal | 0,4817 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 27/07/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 4,07 | 2,34 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 6,6517 | 5,185 |
| Daniel | | 5,36 | 3,38 | Variância | 6,2622 | 5,6102 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 9,61 | 7,46 | Variância agrupada | 5,9362 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 8,85 | 7,56 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 1,0426 | |
| Aldo | | 8,08 | 6,90 | P(T<=t) uni-caudal | 0,1608 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 3,94 | 3,47 | P(T<=t) bi-caudal | 0,3217 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 29/08/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 2,49 | 2,45 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 4,4767 | 4,8683 |
| Daniel | | 3,12 | 3,83 | Variância | 5,5629 | 5,7517 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 6,71 | 7,76 | Variância agrupada | 5,6573 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 4,10 | 4,32 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,285 | |
| Aldo | | 8,03 | 7,93 | P(T<=t) uni-caudal | 0,3906 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 2,41 | 2,92 | P(T<=t) bi-caudal | 0,7813 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 11/09/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 2,78 | 2,61 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 4,5283 | 3,9867 |
| Daniel | | 2,86 | 2,42 | Variância | 4,8894 | 3,9138 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 4,57 | 4,09 | Variância agrupada | 4,4016 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,20 | 2,67 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,4472 | |
| Aldo | | 8,58 | 7,62 | P(T<=t) uni-caudal | 0,3321 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 5,18 | 4,51 | P(T<=t) bi-caudal | 0,6643 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 18/09/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 4,73 | 4,09 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 7,7733 | 6,55 |
| Daniel | | 6,71 | 5,76 | Variância | 6,5576 | 4,7008 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 11,91 | 10,09 | Variância agrupada | 5,6292 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 5,94 | 4,80 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,8931 | |
| Aldo | | 8,29 | 6,99 | P(T<=t) uni-caudal | 0,1964 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 9,06 | 7,57 | P(T<=t) bi-caudal | 0,3928 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 15/10/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 4,13 | 3,93 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 5,7183 | 5,2267 |
| Daniel | | 4,03 | 3,65 | Variância | 2,4941 | 1,8912 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 7,21 | 6,44 | Variância agrupada | 2,1926 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 4,92 | 4,44 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,5751 | |
| Aldo | | 7,68 | 6,77 | P(T<=t) uni-caudal | 0,289 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 6,34 | 6,13 | P(T<=t) bi-caudal | 0,5779 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 05/11/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 3,99 | 3,12 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 5,7533 | 4,765 |
| Daniel | | 4,94 | 4,20 | Variância | 2,7402 | 2,3622 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 8,29 | 7,16 | Variância agrupada | 2,5512 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 4,31 | 3,40 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 1,0718 | |
| Aldo | | 6,89 | 5,85 | P(T<=t) uni-caudal | 0,1545 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 6,10 | 4,86 | P(T<=t) bi-caudal | 0,309 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 22/11/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 4,12 | 2,79 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 5,2217 | 4,0017 |
| Daniel | | 4,07 | 2,69 | Variância | 3,4928 | 3,3459 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 7,95 | 6,67 | Variância agrupada | 3,4193 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 5,28 | 4,18 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 1,1427 | |
| Aldo | | 6,87 | 5,62 | P(T<=t) uni-caudal | 0,1399 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 3,04 | 2,06 | P(T<=t) bi-caudal | 0,2798 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 13/12/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | NO2 | 2,83 | 1,99 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 3,6267 | 2,8067 |
| Daniel | | 2,80 | 2,59 | Variância | 2,0403 | 2,2883 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 5,13 | 3,69 | Variância agrupada | 2,1643 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 4,10 | 1,78 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,9654 | |
| Aldo | | 5,23 | 5,42 | P(T<=t) uni-caudal | 0,1786 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 1,67 | 1,37 | P(T<=t) bi-caudal | 0,3571 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |
| Local | [ ] ppb | 23/02/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 6,66 | 8,86 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 11,292 | 12,205 |
| Daniel | | 10,78 | 10,19 | Variância | 15,939 | 13,051 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 8,85 | 13,24 | Variância agrupada | 14,495 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 10,26 | 9,26 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,416 | |
| Aldo | | 12,97 | 13,21 | P(T<=t) uni-caudal | 0,3433 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 18,23 | 18,47 | P(T<=t) bi-caudal | 0,6865 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 15/03/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 7,01 | 0,82 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 16,01 | 6,97 |
| Daniel | | 13,76 | 1,70 | Variância | 46,621 | 32,966 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 14,90 | 5,75 | Variância agrupada | 39,793 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 13,06 | 6,09 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 2,4821 | |
| Aldo | | 20,51 | 12,06 | P(T<=t) uni-caudal | 0,0162 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 26,82 | 15,40 | P(T<=t) bi-caudal | 0,0324 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 30/03/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 18,85 | 25,95 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 17,077 | 17,06 |
| Daniel | | 14,37 | 14,99 | Variância | 10,268 | 36,911 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 18,14 | 17,32 | Variância agrupada | 23,59 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 14,46 | 8,08 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,0059 | |
| Aldo | | 14,46 | 14,95 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4977 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 22,18 | 21,07 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9954 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 20/04/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 8,59 | 19,01 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 12,665 | 12,353 |
| Daniel | | 10,87 | 4,30 | Variância | 9,1026 | 40,516 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 12,62 | 7,41 | Variância agrupada | 24,809 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 11,83 | 11,90 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,1084 | |
| Aldo | | 14,99 | 10,97 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4579 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 17,09 | 20,53 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9158 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 05/05/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 21,83 | 22,53 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 18,933 | 17,642 |
| Daniel | | 12,01 | 3,99 | Variância | 31,114 | 67,449 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 17,97 | 17,95 | Variância agrupada | 49,282 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 13,76 | 12,87 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,3187 | |
| Aldo | | 20,86 | 21,37 | P(T<=t) uni-caudal | 0,3783 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 27,17 | 27,14 | P(T<=t) bi-caudal | 0,7565 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 25/05/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 3,77 | 9,40 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 9,145 | 9,1883 |
| Daniel | | 7,36 | 7,05 | Variância | 11,312 | 4,5529 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 10,78 | 10,30 | Variância agrupada | 7,9323 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 9,38 | 6,49 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,027 | |
| Aldo | | 9,82 | 9,63 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4896 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 13,76 | 12,26 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9793 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 08/06/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 4,85 | 8,33 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 9,7717 | 12,225 |
| Daniel | | 11,71 | 12,22 | Variância | 9,3261 | 13,645 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 10,06 | 7,23 | Variância agrupada | 11,486 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 7,41 | 16,11 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -1,254 | |
| Aldo | | 11,98 | 14,25 | P(T<=t) uni-caudal | 0,1192 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 12,62 | 15,21 | P(T<=t) bi-caudal | 0,2384 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 28/06/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 12,16 | 16,71 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 19,085 | 19,423 |
| Daniel | | 19,21 | 18,60 | Variância | 18,651 | 4,4289 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 17,10 | 19,25 | Variância agrupada | 11,54 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 20,40 | 18,55 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,173 | |
| Aldo | | 25,24 | 20,53 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4332 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 20,40 | 22,90 | P(T<=t) bi-caudal | 0,8665 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |
| Local | [ ] ppb | 14/07/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 2,83 | 5,45 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 9,87 | 11,185 |
| Daniel | | 7,04 | 8,09 | Variância | 42,918 | 64,308 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 14,32 | 14,73 | Variância agrupada | 53,613 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 3,96 | 1,63 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,311 | |
| Aldo | | 11,17 | 12,90 | P(T<=t) uni-caudal | 0,3811 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 19,90 | 24,31 | P(T<=t) bi-caudal | 0,7621 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 27/07/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 10,52 | 13,98 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 13,807 | 13,253 |
| Daniel | | 10,26 | 11,02 | Variância | 33,357 | 31,869 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 12,18 | 9,30 | Variância agrupada | 32,613 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 8,68 | 8,25 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,1678 | |
| Aldo | | 17,27 | 13,08 | P(T<=t) uni-caudal | 0,435 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 23,93 | 23,89 | P(T<=t) bi-caudal | 0,8701 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |
| Local | [ ] ppb | 29/08/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 22,35 | 24,53 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 28,427 | 28,87 |
| Daniel | | 27,08 | 25,69 | Variância | 28,527 | 25,204 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 26,65 | 27,17 | Variância agrupada | 26,865 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 26,03 | 25,49 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,148 | |
| Aldo | | 30,50 | 33,87 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4426 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 37,95 | 36,47 | P(T<=t) bi-caudal | 0,8852 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 11/09/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 42,42 | 43,61 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 44,513 | 44,963 |
| Daniel | | 52,77 | 51,04 | Variância | 29,413 | 11,993 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 48,91 | 45,47 | Variância agrupada | 20,703 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 40,06 | 41,00 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,171 | |
| Aldo | | 38,57 | 45,82 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4337 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 44,35 | 42,84 | P(T<=t) bi-caudal | 0,8674 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 18/09/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 11,66 | 13,13 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 36,988 | 37,118 |
| Daniel | | 53,64 | 51,06 | Variância | 211,55 | 186,56 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 34,36 | 38,42 | Variância agrupada | 199,06 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 33,04 | 30,52 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,016 | |
| Aldo | | 44,35 | 44,91 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4938 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 44,88 | 44,67 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9876 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 15/10/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 22,03 | 23,40 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 41,813 | 45,083 |
| Daniel | | 49,50 | 54,06 | Variância | 117,71 | 127,52 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 38,28 | 47,96 | Variância agrupada | 122,61 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 41,91 | 43,29 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,511 | |
| Aldo | | 48,01 | 48,92 | P(T<=t) uni-caudal | 0,3101 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 51,15 | 52,87 | P(T<=t) bi-caudal | 0,6201 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 05/11/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 11,66 | 12,34 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 22,207 | 22,32 |
| Daniel | | 23,93 | 23,89 | Variância | 58,509 | 58,233 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 17,71 | 20,92 | Variância agrupada | 58,371 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 19,11 | 16,34 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,026 | |
| Aldo | | 33,04 | 33,87 | P(T<=t) uni-caudal | 0,49 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 27,79 | 26,56 | P(T<=t) bi-caudal | 0,98 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 22/11/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 4,47 | 2,30 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 11,92 | 11,08 |
| Daniel | | 2,63 | 2,25 | Variância | 69,862 | 76,439 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 19,63 | 19,48 | Variância agrupada | 73,151 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 5,96 | 4,95 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | 0,1701 | |
| Aldo | | 19,11 | 17,93 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4342 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 19,72 | 19,57 | P(T<=t) bi-caudal | 0,8683 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

| Local | [ ] ppb | 13/12/2022 | | Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Comer | Home | | | |
| Casa | O3 | 6,05 | 6,53 | | *Comer* | *Home* |
| | | | | Média | 18,888 | 19,007 |
| Daniel | | 14,37 | 13,57 | Variância | 94,944 | 92,572 |
| | | | | Observações | 6 | 6 |
| Rodo | | 22,61 | 20,89 | Variância agrupada | 93,758 | |
| | | | | Hipótese da diferença de média | 0 | |
| Alfredo | | 25,86 | 26,65 | gl | 10 | |
| | | | | Stat t | -0,021 | |
| Aldo | | 12,10 | 13,70 | P(T<=t) uni-caudal | 0,4918 | |
| | | | | t crítico uni-caudal | 1,8125 | |
| UFR | | 32,34 | 32,70 | P(T<=t) bi-caudal | 0,9835 | |
| | | | | t crítico bi-caudal | 2,2281 | |

## Anexo 8. 3 Código fonte gerado com GPT chat para o fotômetro “homemade”

```
 #include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_TSL2561_U.h>

#define LCD_ADDR 0x27  // Defina o endereço I2C do display LCD 16x2

// Inicialize o objeto do display LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDR, 16, 2);

// Inicialize o objeto do sensor TSL2561
Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 12345);

void setup() {
  // Inicialize a comunicação I2C
  Wire.begin();

  // Inicialize o display LCD
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setBacklight(HIGH);

  // Inicialize o sensor TSL2561
  if (!tsl.begin()) {
    Serial.println("Falha ao inicializar o sensor TSL2561!");
    while (1);
  }
  // Configure o ganho do sensor (opcional)
  tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X);

  // Configurar o tempo de integração do sensor (opcional)
  tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_13MS);
}
void loop() {
  // Obtenha a luminosidade do sensor
  sensors_event_t event;
  tsl.getEvent(&event);

  // Imprima os valores no monitor serial
  Serial.print("Luminosidade: ");
  Serial.print(event.light);
  Serial.println(" lux");

  // Atualize o display LCD
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Luminosidade:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(event.light);
  lcd.print(" lux");

  delay(1000); // Aguarde um segundo antes de atualizar novamente
}
```