

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Engenharias**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais**  
**Mestrado em Ciências Ambientais**



***BOUGAINVILLEA GLABRA COMO BIOINDICADOR AMBIENTAL DE  
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM AMBIENTE URBANO***

**Mariela Vieira Peixoto da Silva**

**Pelotas, 2025**

**Mariela Vieira Peixoto da Silva**

***BOUGAINVILLEA GLABRA COMO BIOINDICADOR AMBIENTAL DE  
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM AMBIENTE URBANO***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCAMB) do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestrado em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Robson Andreazza

Co-orientadora: Dra. Marília Lazarotto

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Félix Alonso

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

S586b Silva, Mariela Vieira Peixoto da

*Bougainvillea glabra* como bioindicador ambiental de poluição atmosférica em ambiente urbano [recurso eletrônico] / Mariela Vieira Peixoto da Silva ; Robson Andreazza, orientador ; Marília Lazarotto, Marcelo Félix Alonso, coorientadores. — Pelotas, 2025.

123 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Estresse oxidativo. 2. Enzimas antioxidantes. 3. Biomonitoramento. 4. Sustentabilidade ambiental. I. Andreazza, Robson, orient. II. Lazarotto, Marília, coorient. III. Alonso, Marcelo Félix, coorient. IV. Título.

CDD 363.7

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

Mariela Vieira Peixoto da Silva

***Bougainvillea glabra* COMO BIOINDICADOR AMBIENTAL DE POLUIÇÃO  
ATMOSFÉRICA EM AMBIENTE URBANO**

Dissertação de mestrado como requisito parcial, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25 de Fevereiro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Robson Andreazza (Orientador)  
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (Presidente)

Profa. Dra. Marília Lazarotto (Co-orientadora)  
Doutora em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Prof. Dr. Marcelo Félix Alonso (Co-orientador)  
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Prof. Dr. Gustavo Maia Souza  
Doutor em Biologia Vegetal pela Universidade Estadual Paulista de São Paulo – UNESP

Prof. Dr. Cícero de Coelho Escobar  
Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Érico Kunde Corrêa  
Doutor em Biotecnologia pela Universidade Federal de Pelotas - UFPel

Prof. Dra. Diuliana Leandro (Suplente)  
Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná – UFPR

## Resumo

SILVA, Mariela Vieira Peixoto da. ***Bougainvillea glabra* como bioindicador ambiental de poluição atmosférica em ambiente urbano.** Orientador: Robson Andreazza. Co-orientador(es): Marília Lazarotto e Marcelo Félix Alonso. 2025. 126f. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais - Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

A poluição atmosférica refere-se à introdução de substâncias ou partículas nocivas na atmosfera, resultando em prejuízos ao equilíbrio ambiental, à qualidade do ar e à saúde dos seres vivos. Essa contaminação se dá pelas emissões e por substâncias poluentes, metais pesados e material particulado. Os bioindicadores vegetais vêm sendo aplicados como uma metodologia complementar de biomonitoramento. O mesmo permite a avaliação da resposta dos organismos vivos frente à poluição e sua aplicação na biorremediação ambiental. Dentre os objetivos da ODS, o tema desta pesquisa possui interface com a ODS 3 - Saúde e Bem-estar, ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis e ODS 15 - Vida Terrestre. O presente estudo tem como objetivo a investigação da espécie *Bougainvillea glabra* como potencial bioindicador ambiental de poluição atmosférica no município de Pelotas/RS. As análises foram realizadas na planta *B. glabra* e no ambiente que circunda a planta. Os parâmetros bioquímicos da espécie foram determinados através da atividade enzimática (SOD, CAT e GPx) e estresse oxidativo (TBARS). Para a determinação dos parâmetros ambientais foi verificada a qualidade do ar nos pontos de coleta. O material particulado (MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>), a temperatura (T), e a umidade relativa do ar (UR) foram mensuradas através do uso de sensor móvel *AirBeam2* pelo período de exposição de 15 min. A investigação da *Bougainvillea glabra* como bioindicador ambiental em Pelotas/RS revelou sua eficácia na identificação de impactos da poluição atmosférica. Alterações morfológicas, como necrose, clorose, e presença de fungos fitopatogênicos e lagartas, foram relacionadas à exposição aos poluentes MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>. Além disso, análises de estresse oxidativo nas folhas, flores e brácteas indicaram variações significativas nos níveis de malondialdeído (MDA) e na atividade das enzimas antioxidantes (SOD, CAT e GPx), especialmente nos meses críticos de novembro e dezembro. O monitoramento integrado de material particulado (MP) e radiação solar destacou a relação entre dispersão de poluentes e condições ambientais. Esses achados consolidam a *Bougainvillea glabra* como uma ferramenta promissora para o monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas, com potencial para identificar impactos e orientar ações de conservação ambiental. Estudos futuros podem aprofundar a correlação entre estresse oxidativo e parâmetros ambientais específicos para expandir sua aplicabilidade.

Palavras-chave: Estresse oxidativo, Enzimas antioxidantes, Biomonitoramento, Sustentabilidade ambiental.

## Abstract

SILVA, Mariela Vieira Peixoto da. ***Bougainvillea glabra* as an environmental bioindicator of air pollution in an urban environment.** Advisor: Robson Andreazza. Co-advisor: Marília Lazarotto and Marcelo Félix Alonso. 2025. 126f. Dissertation (Master in Environmental Sciences) - Engineering Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

Air pollution refers to the introduction of harmful substances or particles into the atmosphere, causing damage to environmental balance, air quality, and the health of living beings. Vegetative bioindicators have been applied as a complementary biomonitoring methodology, allowing the assessment of organisms' responses to pollution and their potential use in environmental bioremediation. This study aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically SDG 3 - Good Health and Well-being, SDG 11 - Sustainable Cities and Communities, and SDG 15 - Life on Land. The aim of this research is to investigate *Bougainvillea glabra* as a potential bioindicator of air pollution in Pelotas/RS. Analyses were conducted on the *Bougainvillea glabra* plant and its surrounding environment. Biochemical parameters of the plant were determined through enzymatic activity (SOD, CAT, and GPx) and oxidative stress (TBARS). Air quality measurements assessed environmental parameters at the collection points. Particulate matter (PM2.5 and PM10), temperature (T), and relative humidity (RH) were measured using the AirBeam2 mobile sensor during a 15-minute exposure period. The investigation of *Bougainvillea glabra* as an environmental bioindicator in Pelotas/RS demonstrated its effectiveness in identifying air pollution impacts. Morphological changes, such as necrosis, chlorosis, and the presence of phytopathogenic fungi and caterpillars, were associated with exposure to PM2.5 and PM10 pollutants. Furthermore, oxidative stress analyses of the leaves, flowers, and bracts revealed significant variations in malondialdehyde (MDA) levels and antioxidant enzyme activities (SOD, CAT, and GPx), particularly during the critical months of November and December. Integrated monitoring of particulate matter and solar radiation highlighted the relationship between pollutant dispersion and environmental conditions. These findings establish *Bougainvillea glabra* as a promising tool for air quality monitoring in urban areas, with the potential to identify impacts and guide conservation efforts. Future studies should explore the correlation between oxidative stress and specific environmental parameters to expand its applicability.

**Keywords:** Oxidative stress, Antioxidant enzymes, Biomonitoring, Environmental sustainability.

## Lista de Figuras

Figura 1	Taxa de mortalidade por 100.000 atribuível à poluição do ar doméstico por combustíveis sólidos no Brasil.....	22
Figura 2	Número de mortes atribuídas ao MP 2,5 no Brasil, Argentina e Uruguai entre 1990 e 2020.....	23
Figura 3	Metais pesados presentes em aerossóis primários e secundários.....	40
Figura 4	Espectro de resposta biológica das plantas à poluição atmosférica.....	41
Figura 5	Esquema Anatômico de Folha.....	42
Figura 6	Mecanismos de controle da formação de EROs.....	47
Figura 7	Arquétipo da reação de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico.....	48
Figura 8	Fotografias da (A) planta (B) folhas (C) bráctea e flores da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> .....	54
Figura 9	Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.....	57
Figura 10	Mapa da Distribuição espacial dos pontos de coleta.....	59
Figura 11	Fotografias da (A) espécie <i>Bougainvillea glabra</i> no ponto de coleta 1, (B) porte da espécie e (C) detalhe da espécie em floração (C).....	60
Figura 12	Fotografias da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> nos pontos de coleta. Fotos acima, dos Pontos 2 ao 6 e abaixo dos Pontos 7 ao 10.....	60
Figura 13	Amostras de folhas e brácteas secas de <i>Bougainvillea glabra</i> .....	62
Figura 14	Sensor AirBeam2 (a) dimensões (b) vista interna (c) sistema de alta precisão.....	66
Figura 15	(a) sensor AirBeam2 alocado junto a planta <i>Bougainvillea glabra</i> (b) dados de monitoramento em tempo real no aplicativo AirCasting.....	67
Figura 16	Sintomas visuais de (a, b) clorose internerval em folhas, e (c) clorose em brácteas na espécie <i>Bougainvillea glabra</i> .....	70
Figura 17	Sintomas visuais da presença de (a,b,c) fungo, (d) fungo e perfuração causada por lagartas, (e) presença de lagarta na	

	estrutura floral da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> .....	70
Figura 18	Concentração de malondialdeído (MDA) presente nas folhas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	72
Figura 19	Concentração de malondialdeído (MDA) presente nas flores da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	73
Figura 20	Concentração de malondialdeído (MDA) presente nas brácteas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	75
Figura 21	Atividade Enzima Superóxido Dismutase (SOD) presente nas folhas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	77
Figura 22	Atividade Enzima Superóxido Dismutase (SOD) presente nas flores da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	78
Figura 23	Atividade Enzima Superóxido Dismutase (SOD) presente nas brácteas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	80
Figura 24	Atividade Enzima Catalase (CAT) presente nas folhas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	81
Figura 25	Atividade Enzima Catalase (CAT) presente nas flores da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	82
Figura 26	Atividade Enzima Catalase (CAT) presente nas brácteas da	

espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	83
Figura 27 Atividade enzima glutationa peroxidase (GPx) presente nas folhas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	87
Figura 28 Atividade enzima glutationa peroxidase (GPx) presente nas flores da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	86
Figura 29 Atividade enzima glutationa peroxidase (GPx) presente nas brácteas da espécie <i>Bougainvillea glabra</i> dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).....	87
Figura 30 Dados INMET de Radiação para o dia 21 novembro 2022.....	90
Figura 31 Dados INMET de Radiação para o dia 05 dezembro 2022.....	92
Figura 32 Dados INMET de Radiação para o dia 23 de janeiro 2023.....	93
Figura 33 Dados INMET de Radiação para o dia 21 fevereiro 2023.....	96
Figura 34 Dados INMET de Radiação para o dia 13 março 2023.....	98
Figura 35 Correlação entre os níveis de MP <sub>2,5</sub> e os valores de TBARS nas folhas.....	100
Figura 36 Correlação entre os níveis de MP <sub>2,5</sub> e os valores de TBARS nas flores.....	101
Figura 37 Correlação entre os níveis de MP <sub>2,5</sub> e os valores de TBARS nas brácteas.....	103
Figura 38 Correlação entre os níveis de MP <sub>10</sub> e os valores de TBARS nas folhas.....	104
Figura 39 Correlação entre os níveis de MP <sub>10</sub> e os valores de TBARS nas flores.....	105
Figura 40 Correlação entre os níveis de MP <sub>10</sub> e os valores de TBARS nas brácteas.....	107
Figura 41 Correlação entre os níveis de Radiação e os valores de	

	TBARS nas folhas.....	108
Figura 42	Correlação entre os níveis de Radiação e os valores de TBARS nas flores.....	109
Figura 43	Correlação entre os níveis de Radiação e os valores de TBARS nas brácteas.....	110

## **Lista de Quadros**

Quadro 1	Características e principais fontes de poluentes atmosféricos...	26
Quadro 2	Efeitos na saúde e no meio ambiente de poluentes atmosféricos.....	27
Quadro 3	Padrões Nacionais de Qualidade do Ar.....	36
Quadro 4	Municípios com monitoramento no Estado do RS.....	37
Quadro 5	Métodos de medição dos poluentes na Rede Automática.....	38
Quadro 6	Pesquisas relacionadas ao uso de vegetais como bioindicadores.....	50
Quadro 7	Descrição morfológica da planta <i>Bougainvillea glabra</i> .....	53
Quadro 8	Coordenadas geográficas dos pontos de coleta.....	59

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1	Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para novembro/2022.....	89
Tabela 2	Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para dezembro/2022.....	91
Tabela 3	Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para janeiro/2023.....	92
Tabela 4	Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para fevereiro/2023.....	95
Tabela 5	Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para março/2023.....	97

## Lista de Siglas/Elementos

ABTS	2,2'-azinobis-(3-etylbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)
Al	Alumínio
Ar	Argônio
As	Arsênio
Cd	Cádmio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cm	Centímetro
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Crômio
Cu	Cobre
DPPH	2,2-difenil-1-picril-hidrazil, utilizado para medir a atividade antioxidante.
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
FRAP	<i>Ferric Reducing Antioxidant Power</i>
Hg	Mercúrio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
IQAR	Índice de Qualidade do Ar
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP <sub>10</sub>	Material particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 micrômetros
MP <sub>2,5</sub>	Material particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 micrômetros
NH <sub>3</sub>	Hidróxido de amônia
Ni	Níquel
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrogênio

O <sub>3</sub>	Ozônio
OMS	Organização Mundial da Saúde
ORAC	<i>Oxygen Radical Absorbance Capacity</i> , método para medir a capacidade antioxidante de alimentos e compostos.
Pb	Chumbo
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
Pt	Platina
RPM	Rotações por minuto
S	Enxofre
Sb	Antimônio
Se	Selênio
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
WHO	<i>World Health Organization</i>
Zn	Zinco

## Sumário

<b>1 Introdução.....</b>	15
<b>2 Objetivos.....</b>	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
<b>3 Hipóteses.....</b>	18
<b>4 Revisão Bibliográfica .....</b>	19
4.1 Poluição atmosférica.....	19
4.2 Principais poluentes atmosféricos.....	24
4.2.1 Material particulado: PTS, PI, MP <sub>10</sub> e MP <sub>2,5</sub> .....	28
4.2.2 Dióxido de Enxofre.....	29
4.2.3 Dióxido de Nitrogênio.....	30
4.2.4 Monóxido de Carbono.....	31
4.2.5 Ozônio.....	32
4.3 Fontes de Emissão .....	33
4.4 Monitoramento da qualidade do ar.....	34
4.5 Efeitos da poluição atmosférica na saúde humana.....	35
4.6 Interações dos poluentes atmosféricos com as plantas.....	40
4.7 Bioindicadores ambientais.....	45
4.7.1 Estresse oxidativo nas plantas.....	46
4.7.2 Bioindicadores vegetais.....	49
4.7.3 Bougainvillea glabra Choisy.....	52
<b>5. Materiais e métodos.....</b>	57
5.1 Área de estudo.....	58
5.2 Procedimento de coleta e armazenamento.....	61
5.3 Análises bioquímicas da Bougainvillea glabra.....	62
5.3.1 Obtenção do extrato enzimático.....	62
5.3.2 Determinação da atividade da enzima superóxido dismutase.....	63
5.3.3 Determinação da atividade da enzima catalase.....	63
5.3.4 Determinação da atividade da enzima glutationa peroxidase.....	64
5.3.5 Determinação das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico.....	64
5.3.6 Determinação de proteína.....	65
5.4 Análises da qualidade do ar nos pontos de coleta.....	65

5.5 Análise de Dados.....	67
<b>6. Resultados e Discussão.....</b>	<b>69</b>
6.1 Alterações da morfologia floral e foliar.....	69
6.2 Aptidão da <i>Bougainvillea glabra</i> como bioindicadora.....	71
6.3 Qualidade do ar nos pontos de coleta.....	88
6.4 Correlação pelo Método de Pearson entre Material Particulado e TBARS.	99
6.5 Correlação entre a radiação e TBARS.....	107
<b>7. Considerações finais.....</b>	<b>112</b>
<b>8. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>113</b>

## 1 Introdução

A Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII, impulsionou avanços globais nos setores econômico, industrial, tecnológico e médico, impactando diretamente a qualidade de vida (Song et al., 2020). Ao longo das décadas subsequentes, o contínuo progresso industrial resultou no aumento exponencial da poluição atmosférica. Com isso, a visão da humanidade sobre questões ambientais e a interligação desses efeitos na saúde pública e no meio ambiente necessitou de uma reconfiguração (Pott; Estrela, 2017). A poluição atmosférica origina-se principalmente pelas ações antrópicas. Tais como, as liberações procedentes da queima de combustíveis fósseis e de processos industriais, as queimadas de biomassa, entre outras fontes. Como consequência, tem-se o impacto ambiental nos ecossistemas, influenciando nas mudanças climáticas e na saúde e bem-estar humano (Santos et al., 2020).

A contaminação atmosférica ocorre pela emissão de poluentes como compostos de enxofre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ); compostos de nitrogênio ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , nitratos); compostos orgânicos de carbono, monóxido, dióxido de carbono e material particulado  $\text{MP}_{10}$  e  $\text{MP}_{2,5}$  (Derisio, 2000). Adicionado da presença de metais pesados como Cobalto (Co), Argônio (Ar), Alumínio (Al), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Zinco (Zn) (Aquino, 2011; Maki et al., 2013), entre outros. De acordo com Klumpp (2001), a poluição do ar causa danos tanto para a população, quanto para o meio ambiente e o meio urbano.

Concentrações elevadas de poluentes atmosféricos representam um risco para a saúde humana, danificam flora e fauna e destroem monumentos históricos e construções modernas. Tais efeitos ocorrem com alta frequência em aglomerações urbanas, considerando que uma grande quantidade dos mais diversos poluentes está sendo emitida em área relativamente limitada e muitos indivíduos estão sendo afetados, devido à alta densidade populacional (Klumpp, 2001, p. 512).

Investigações conduzidas por Dapper (2016), Gouveia et al. (2006) e Santos et al. (2020) têm identificado correlações entre os efeitos dos poluentes atmosféricos na saúde humana. Atrelado a isso, tem-se o surgimento de doenças respiratórias,

cardiorrespiratórias, acidentes vasculares encefálicos, entre outras condições. Esses estudos evidenciam a influência direta da poluição atmosférica nas taxas de comorbidades e mortalidade em escala global.

Diante da concentração de poluentes, o método tradicional de monitoramento da qualidade do ar utiliza estações fixas e móveis. Além de equipamentos e técnicas físico-químicas, que demandam custos elevados em implantação, operação e manutenção, como a AR DO SUL - Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (FEPAM, 2022). No contexto da mitigação da poluição, o biomonitoramento emerge como uma abordagem complementar para avaliar o potencial de contaminação em ambientes por poluentes e metais, fornecendo informações específicas e sustentáveis, conforme destacado por Aquino et al. (2011). Este método apresenta-se como uma alternativa viável, acessível, ambientalmente sustentável e economicamente eficiente em comparação com as abordagens tradicionais de monitoramento (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2015).

A espécie *Bougainvillea glabra* foi selecionada devido à sua condição de espécie nativa do Brasil (Soni et al., 2019). A mesma é encontrada naturalmente na região sul do Brasil e adaptada às condições edafoclimáticas locais, além de ser comumente utilizada com propósitos ornamentais (Ahmed, 2014). Em uma revisão bibliográfica subsequente, observou-se uma lacuna nos estudos dedicados a essa espécie em território nacional, uma vez que as investigações existentes se concentram em seus constituintes de forma isolada (folha, flor e brácteas). Assim, esta pesquisa busca suprir essa ausência ao fornecer dados científicos adicionais sobre a *Bougainvillea glabra*, visando seu potencial emprego como bioindicador ambiental em ambientes urbanos.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente estudo tem como objetivo a investigação da espécie *Bougainvillea glabra* como potencial bioindicador ambiental de poluição atmosférica no município de Pelotas/RS.

### **2.2 Objetivos específicos**

Analisar alterações na morfologia floral e foliar de indivíduos da planta *Bougainvillea glabra* devido à exposição aos poluentes MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> em pontos localizados na cidade de Pelotas - RS.

Verificar a aptidão da espécie *Bougainvillea glabra* como bioindicadora por meio da análise de estresse oxidativo e suas atividades enzimáticas na folha, flor e brácteas.

Analisar a relação entre a contaminação atmosférica por material particulado (MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>), a incidência de irradiação e a espécie *Bougainvillea glabra* como bioindicadora pelo método passivo.

### **3 Hipóteses**

- H1 – A espécie *Bougainvillea glabra* apresentará alterações morfológicas em tecidos foliares e florais significativas como resposta aos poluentes atmosféricos aos quais a espécie está exposta;
- H2 – A espécie *Bougainvillea glabra* pode ser utilizada como planta bioindicadora.
- H3 – A avaliação da contaminação atmosférica pelo método passivo mostrará uma relação direta entre os níveis de material particulado (MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>), as respostas bioquímicas e o estresse oxidativo na espécie *Bougainvillea glabra*.

## 4 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desta pesquisa foi estruturada em sete tópicos principais que abordam aspectos críticos da poluição atmosférica. Inicia-se com uma análise dos principais poluentes atmosféricos, suas fontes de emissão e os impactos ambientais resultantes. Em seguida, são discutidos os métodos de monitoramento da qualidade do ar e os efeitos da poluição sobre a saúde humana. A revisão também explora as interações entre os poluentes atmosféricos e as plantas, destacando o papel dos bioindicadores ambientais como ferramentas essenciais para a avaliação e gestão da poluição atmosférica.

Além disso, o presente estudo da utilização de *Bougainvillea glabra* como bioindicador de poluição atmosférica apresenta uma sinergia com os princípios dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), formam a agenda global destinada a promover o equilíbrio entre crescimento econômico, preservação ambiental e justiça social até 2030. Dentre os 17 objetivos, destacam-se aqueles que possuem maior interface com o tema da pesquisa, como a ODS 3 - Saúde e Bem-estar, ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis e ODS 15 - Vida Terrestre. Como espécie ornamental amplamente cultivada em áreas urbanas, ela oferece uma solução prática e acessível para o monitoramento ambiental. Além disso, o caráter interdisciplinar da pesquisa alinha-se aos esforços globais para integrar ciência, tecnologia e inovação em prol de soluções sustentáveis, promovendo a conscientização sobre os impactos da poluição.

### 4.1 Poluição atmosférica

A poluição atmosférica é originada da emissão de poluentes em veículos automotivos, processos industriais, queima de biomassa, entre outras ações antrópicas. Essas ações afetam o relacionamento entre os seres vivos e o meio ambiente, a ainda interfere, seja direta ou indiretamente, a nossa vida e bem-estar, com danos aos recursos naturais (Guarnieri; Balmes, 2014; *United States Environmental Protection Agency*, 1992, p. 2, tradução nossa).

No Quinto Relatório do Comitê de Especialistas em Saneamento Ambiental da *World Health Organization* (1957, p.3), a poluição do ar foi definida como as circunstâncias em que a atmosfera exterior contém substâncias em concentrações prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Cerca de seis décadas depois, o mesmo órgão (*World Health Organization*, 2022), define que a poluição do ar é caracterizada como a presença de agentes químicos, físicos ou biológicos que alteram as propriedades naturais da atmosfera, seja no ambiente interno ou externo.

A poluição do ar inclui a poluição interna (doméstica) e a poluição externa, onde impacta sobre a saúde humana e o meio ambiente (EPA, 2019). A poluição doméstica (interna) ocorre em ambientes fechados, como residências, escritórios e indústrias, sendo causada por fatores como ventilação atmosférica, produtos químicos voláteis, fumaça de cigarro e mofo (Balmes, 2019).

Em países de baixa renda, a combustão de biomassa, incluindo madeira, carvão, palha, esterco e carvão vegetal, em fogões domésticos, representa uma fonte significativa de poluição do ar interior, impactando desproporcionalmente mulheres e crianças (Al-kindí, 2020; Balmes, 2019).

Enquanto a poluição externa é gerada em ambientes abertos e resulta da liberação de emissões atmosféricas provenientes de veículos, emissões industriais, contribuindo para problemas ambientais como o aquecimento global e a alteração na qualidade do ar. Embora distintas, ambas possuem interconexões, uma vez que as fontes externas podem se infiltrar em espaços internos, agravando os riscos à saúde (*Health Effects Institute*, 2024).

Os registros históricos retratam acidentes ambientais ocorridos globalmente ao longo do tempo. Muitos deles associados à expansão da industrialização e notadamente relacionados à poluição atmosférica. Como o desastre no Vale de Meuse – Bélgica em 1930, causado por uma inversão atmosférica de poluentes com morte trágica de 60 pessoas. Em Donora – Estados Unidos ocorreu uma situação semelhante a essa no ano de 1948 (Pott; Estrela, 2017).

Em 1950, ocorreu o acidente em Poza Rica – México, em que sulfeto de hidrogênio proveniente de um campo de petróleo foi accidentalmente lançado no ar sob uma inversão de temperatura de baixa altitude (Britannica, 2013). Em Londres – Inglaterra, no ano de 1952, a chamada "Névoa Matadora" resultou em mais fatalidades e complicações de saúde para a população (Pott; Estrela, 2017). Em

1984, na Índia ocorreu um vazamento de gases tóxicos da indústria de agrotóxicos Union Carbide em Bhopal (Broughton, 2005).

No Brasil, em Cubatão, localizada no estado de São Paulo, foi historicamente uma das cidades mais poluídas do mundo durante as décadas de 1970 e 1980, chamada de “Vale da morte” devido à intensa atividade industrial sem controle ambiental adequado. A cidade sofreu com altos índices de poluição do ar, da água e do solo, resultando em graves problemas de saúde para a população, incluindo doenças respiratórias e más-formações congênitas (Vasconcelos et al., 1987). O impacto ambiental também foi severo, com a devastação da vegetação da Serra do Mar. A partir dos anos 1990, medidas rigorosas de controle ambiental e recuperação ecológica foram implementadas, reduzindo significativamente a poluição e promovendo a recuperação da qualidade de vida na região (Galvão Filho, 1987).

Os efeitos da poluição atmosférica passaram a ser pesquisados pela Organização Mundial de Saúde - OMS, e foram descritos no relatório “Poluição do ar: quinto relatório do Comitê de Peritos em Saneamento Ambiental”. Este relatório foi oriundo da reunião realizada no ano de 1957 em Genebra – Suíça. O mesmo aconselhava a atenuação com relação aos níveis de emissões de poluentes para a proteção à saúde (Santos et al., 2020). O relatório da OMS (1957, p.3) trazia algumas constatações, dentre elas: “a indústria se expandiu rapidamente, os centros populacionais congestionados cresceram e o transporte motorizado passou a ser de uso comum, o que resultou em um aumento dos poluentes do ar.”

Santos et al. (2020) mostraram uma estimativa preocupante em relação a poluição do ar ambiental e os seus efeitos respiratórios na população.

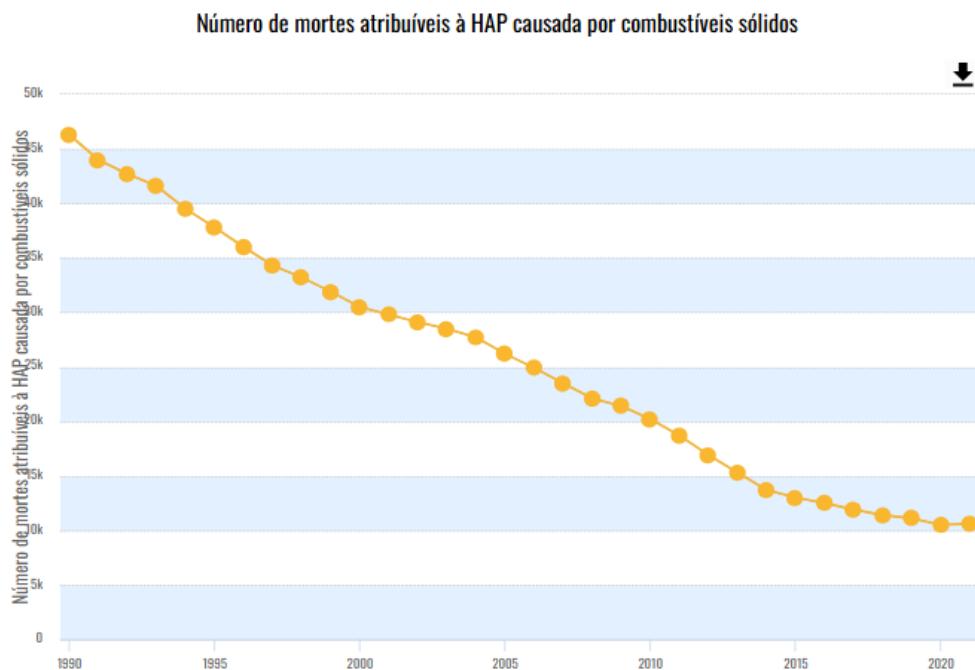
Estima-se que a poluição do ar foi globalmente responsável por cerca de 5 milhões de óbitos em 2017, 70% deles decorrentes da poluição do ar ambiental externa. A poluição do ar ambiental somada à intradomiciliar ocupa o quinto lugar entre os cinco mais relevantes fatores de risco para óbitos no mundo (Santos et al., 2020, p.1).

Além disso, a qualidade do ar está relacionada ao clima e aos ecossistemas da terra. Muitos dos fatores da poluição do ar também são fontes de emissões de gases com efeito de estufa, tal como a combustão de combustíveis fósseis (*World Health Organization*, 2022).

Recentemente, na lista informada pela *Health Effects Institute* (2024), a *Global Risk factor for Death*<sup>1</sup> aponta que a poluição do ar foi o segundo fator de risco de morte, apenas atrás de pressão alta em 2021 entre adultos e crianças até cinco anos (Boogaard et al., 2019, *Health Effects Institute*, 2024). Até o momento, vários estudos realizados pelo *Health Effects Institute* (2024), revelou informações de muitos países, confirmado uma correlação entre a mortalidade da população associada a poluição atmosférica. No Brasil, podemos verificar a taxa de mortalidade ocorrida no período de 30 anos (1990 a 2020) em decorrência da poluição por material particulado tanto para poluição interna como para a externa.

Na Figura 1, podemos verificar a redução gradativa de mortalidade por poluição doméstica no Brasil. Contudo, o estudo do GBD estimou declínios na exposição ao risco de 2010 a 2019, porém a poluição do ar foi responsável por 6,7 milhões de mortes em todo o mundo em 2019 (GBD, 2020; Roth et al., 2020).

Figura 1 - Taxa de mortalidade por 100.000 atribuíveis à poluição do ar doméstico por combustíveis sólidos no Brasil.



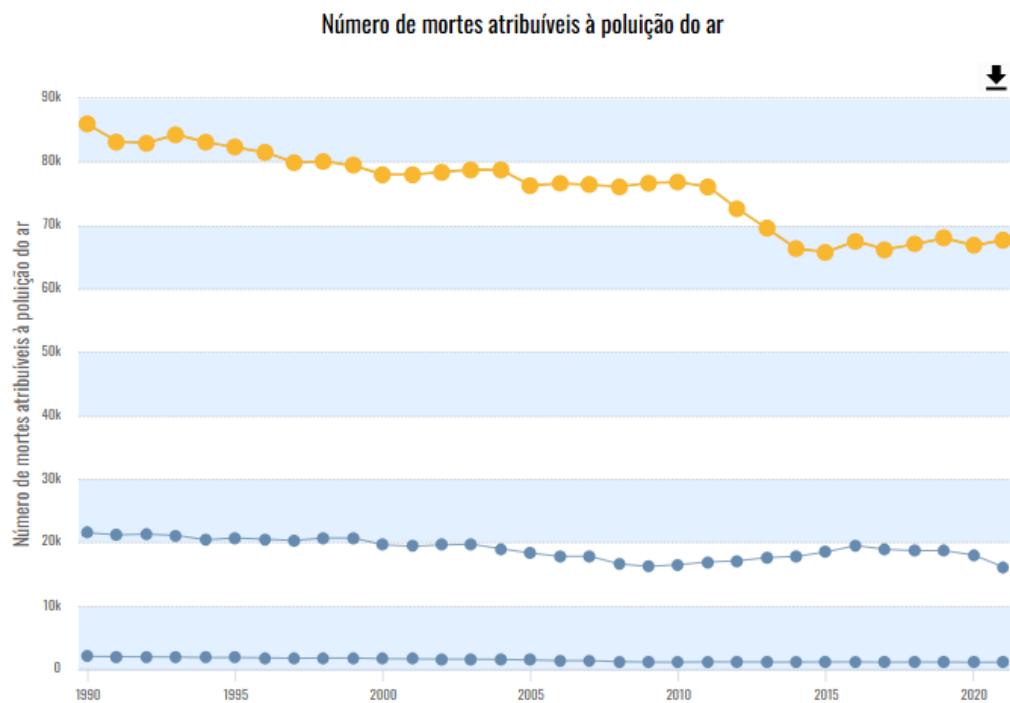
Fonte: Global Burden of Disease Study 2021. IHME, 2024.

Na Figura 2, no Brasil, segundo o *Health Effects Institute* (2024) podemos verificar a relação crescente entre o número de mortalidade ocorridas no período de

<sup>1</sup> Fator de Risco Global para Mortalidade.

30 anos em decorrência da exposição ao material particulado, com diferença superior em comparação a países como Argentina e Uruguai.

Figura 2: Número de mortes atribuídas ao MP<sub>2,5</sub> no Brasil, Argentina e Uruguai entre 1990 e 2020.



Fonte: Global Burden of Disease Study 2021. IHME, 2024.

Das fatalidades registradas, 4,1 milhões foram atribuídas à poluição do ar ambiente, enquanto 2,3 milhões foram relacionadas à poluição do ar doméstico. Estimativas adicionais, fundamentadas em métricas alternativas de exposição e modelos de resposta mais contemporâneos, indicam que a poluição atmosférica poderia ser responsável por um espectro mais amplo de 9 a 12 milhões de óbitos anualmente (Burnett et al., 2018; Lelieveld et al., 2019).

Atualmente o tema poluição é discutido junto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas, mais especificamente no ODS 13, a qual trata especificamente da ação contra a poluição atmosférica e suas graves consequências para o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas (Nações Unidas Brasil, 2023).

## 4.2 Principais poluentes atmosféricos

Os principais poluentes atmosféricos podem ser classificados como primários e secundários, dependendo de sua origem. Os poluentes primários, emitidos diretamente de fontes naturais ou antrópicas, incluem o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os compostos orgânicos voláteis (COVs) e o material particulado (MP), como  $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$ . Já os poluentes secundários, formados por reações químicas na atmosfera, incluem o ozônio troposférico ( $\text{O}_3$ ), produzido por reações entre  $\text{NO}_x$  e COVs na presença de luz solar, e os nitratos e sulfatos, que contribuem para a formação de partículas finas e chuva ácida. Esses poluentes variam em composição e toxicidade, mas, em conjunto, impactam negativamente a saúde humana, prejudicam ecossistemas e contribuem para mudanças climáticas. (Derisio, 2000).

A *United States Environmental Protection Agency - EPA*, em sua publicação intitulada “*Terms of Environment: Glossary, abbreviations and acronyms*” descreve os poluentes atmosféricos.

Qualquer substância no ar que possa, em concentração suficientemente alta, prejudicar o homem, outros animais, a vegetação ou o material. Os poluentes podem incluir quase qualquer composição natural ou artificial da matéria transportada pelo ar, capaz de ser transportada pelo ar. Eles podem estar na forma de partículas sólidas, gotículas líquidas, gases, ou em combinação com eles. Geralmente, eles se dividem em dois grupos principais: (1) aqueles emitidos diretamente de fontes identificáveis e (2) aqueles produzidos no ar por ação interativa entre dois ou mais poluentes primários, ou por reação com constituintes atmosféricos normais, com ou sem fotoativação. Exclusivamente de pólen, neblina e poeira, que são de origem natural, cerca de 100 contaminantes foram identificados e se enquadram nas seguintes categorias: sólidos, compostos de enxofre, produtos químicos orgânicos voláteis, compostos nitrogenados, compostos de oxigênio, compostos halogenados, compostos radioativos e odores (United States Environmental Protection Agency, 1992, p.2, tradução nossa).

Os Poluentes atmosféricos, segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 491/2018 são definidos como:

Qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos

materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2018).

Cada órgão busca descrever e definir os poluentes atmosféricos, no entanto faz-se necessário compreender e investigar as características e as principais fontes poluidoras. Neste sentido, a pesquisa científica busca desenvolver estratégias eficazes de mitigação e controle, e até mesmo subsidiar políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar.

Sabe-se que a composição química e o comportamento físico dos poluentes determinam sua dispersão na atmosfera, sua persistência e os potenciais impactos que podem causar à saúde humana e no ambiente. Investigações científicas demonstram que fontes antropogênicas, como veículos automotores, processos industriais e agricultura intensiva, são os principais vetores dessas emissões, destacando a necessidade de intervenções tecnológicas e regulatórias para mitigar os efeitos locais e globais da poluição atmosférica.

A seguir, apresentam-se as características e principais fontes de poluentes atmosféricos no Quadro 1 e os efeitos na saúde e no meio ambiente de poluentes atmosféricos no Quadro 2.

Quadro 1 - Características e principais fontes de poluentes atmosféricos

Poluente	Características	Principais Fontes Antropogênicas	Principais Fontes Naturais
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Tamanho < 100 micra	Processos industriais, veículos (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa	Pólen, aerossol marinho e solo.
Partículas Inaláveis (PI <sub>10</sub> )	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensos no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Tamanho < 10 $\mu\text{m}$	Processos de combustão (indústrias e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Pólen, aerossol marinho e solo.
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	Gás incolor, com forte odor e altamente solúvel. Na presença de vapor d'água pode ser transformado a SO <sub>3</sub> e H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (chuva ácida). Precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das PIs.	Combustão de combustíveis fósseis (carvão), queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel.	Vulcões, emissões de reações biológicas.
Óxidos de Nitrogênio (NOx)	Podem levar a formação de HNO <sub>3</sub> , nitratos e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão em veículos, indústrias, usinas termoelétricas (óleo, gás, carvão) e incineração.	Processos biológicos no solo e relâmpagos.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em geral, principalmente em veículos.	Queimadas e reações fotoquímicas.
Ozônio (O <sub>3</sub> )	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica ( <i>smog</i> ). Composto muito ativo quimicamente.	Não é emitido diretamente à atmosfera, sendo produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os NOx e (COVs).	

Fonte: Adaptado de FEPAM, 2022.

Quadro 2 - Efeitos na saúde e no meio ambiente de poluentes atmosféricos

Poluente	Efeitos sobre a Saúde	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Causam efeitos significativos em pessoas com doenças pulmonares, como asma e bronquite.	Danos a vegetação, redução da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas Inaláveis (MP <sub>10</sub> e MP <sub>2,5</sub> )	Aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras. Insuficiências respiratórias pela deposição deste poluente nos pulmões.	Danos a vegetação, redução da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma, doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis ao SO <sub>2</sub> . Irritação ocular.	Pode levar a formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação.
Óxidos de Nitrogênio (NOX)	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação.
Monóxido de Carbono (CO)	Causa efeito danoso no sistema nervoso central, com perda de consciência e visão. Exposições mais curtas podem também provocar dores de cabeça e tonturas.	
Ozônio (O <sub>3</sub> )	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposição a altas concentrações pode resultar em sensações de aperto no peito, tosse e chiado na respiração. O O <sub>3</sub> tem sido associado ao aumento de admissões hospitalares.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais. Pode danificar materiais devido ao seu alto poder oxidante.

Fonte: Adaptado de FEPAM, 2019

#### 4.2.1 Material particulado: PTS, PI, MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>

O termo material particulado é utilizado de diferentes formas para se referir às partículas presentes no ar, incluindo categorias como partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI) entre outras. Compreender essas distinções, suas fontes e os diferentes tipos de partículas relacionadas à poluição atmosférica é fundamental para avaliar seus impactos na saúde humana e no meio ambiente.

O material particulado (MP) refere-se a partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição do ar ou formadas diretamente na atmosfera. Quando essas partículas são dispersas no ar, elas formam os chamados aerossóis. O tamanho das partículas de interesse para a poluição atmosférica está na faixa de 0,01 a 100 micrômetros. Pode ser classificado de acordo com o método de formação, e entre as categorias mais comuns estão às poeiras, névoas, fumos e fumaça (Hadley et al., 2018; Boogaard et al., 2019).

As poeiras são partículas sólidas geradas por processos de desintegração mecânica, como moagem e britagem. As névoas são partículas líquidas formadas por condensação ou dispersão de líquidos. Os fumos, que são formados por condensação ou sublimação de substâncias gasosas provenientes de processos de vaporização de sólidos, como ocorrem na oxidação de fumos metálicos. Já a fumaça é composta principalmente por partículas sólidas originadas pela combustão de combustíveis fósseis, materiais asfálticos ou madeiras. A fumaça pode conter uma mistura de partículas líquidas e uma fração mineral, como as cinzas provenientes da queima de madeira e carvão. (Daellenbach et al., 2020).

As partículas totais em suspensão (PTS) abrangem todas as partículas no ar, com diâmetro de até 100  $\mu\text{m}$ . Embora úteis para descrever a carga total de partículas na atmosfera, as PTS incluem partículas maiores, que geralmente não apresentam o mesmo nível de risco das inaláveis. A diferenciação entre PTS, MP<sub>10</sub>, e MP<sub>2,5</sub> é crucial para o monitoramento da qualidade do ar e para a formulação de políticas públicas voltadas à redução dos danos associados à poluição atmosférica (*World Health Organization*, 2023).

Entre as categorias de material particulado relacionadas à poluição atmosférica, destacam-se o MP<sub>10</sub> e o MP<sub>2,5</sub>, classificados com base no diâmetro aerodinâmico das partículas. O MP<sub>10</sub> compreende partículas com diâmetro de até 10  $\mu\text{m}$ , enquanto o MP<sub>2,5</sub> é formado por partículas menores, com até 2,5  $\mu\text{m}$ . Essas

partículas, também conhecidas como inaláveis (PI), são capazes de penetrar nas vias respiratórias (FEPAM, 2019). O MP<sub>10</sub> atinge as vias superiores, como nariz e garganta, enquanto o MP<sub>2,5</sub>, devido ao seu tamanho reduzido, pode alcançar os alvéolos pulmonares e até entrar na corrente sanguínea, causando efeitos mais graves à saúde, como doenças cardiovasculares e respiratórias (Carter et al., 2017; Secrest et al., 2017; Hadley et al., 2018; Caldeira et al., 2022).

O material particulado MP<sub>2,5</sub>, devido ao seu tamanho reduzido, pode permanecer suspenso na atmosfera por longos períodos, sendo inalado profundamente nos pulmões (Caldeira et al., 2022). Originado de processos como combustão, emissões veiculares e atividades industriais, além de fenômenos naturais como incêndios florestais. O MP<sub>2,5</sub> é um dos principais alvos de regulamentações, estudos ambientais e epidemiológicos (GBD, 2020). Este material particulado é amplamente associado a impactos adversos à saúde, incluindo irritações respiratórias, agravamento de doenças crônicas e problemas cardiovasculares.

Finalmente, o material particulado MP10 compreende partículas de maior tamanho, as quais originam-se de fontes diversas, incluindo atividades industriais, emissões veiculares e poeira natural, e que permanecem suspensas na atmosfera, sendo suscetíveis à inalação. Esse tipo de poluição atmosférica representa um risco considerável à saúde humana, conforme alertado pelo Ministério do Meio Ambiente (2018), estando associada a múltiplas fontes emissoras de poluentes.

#### **4.2.2 Dióxido de Enxofre**

O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) é um gás amplamente conhecido por seu impacto significativo na poluição atmosférica. Como integrante da classe dos óxidos de enxofre, ele desempenha um papel central na degradação da qualidade do ar e na formação de poluentes secundários, sendo essencial entender suas fontes, características e consequências ambientais e para a saúde humana.

O SO<sub>2</sub> é um composto químico formado por um átomo de enxofre e dois de oxigênio, liberado principalmente por processos de combustão de materiais contendo enxofre, como carvão e petróleo. Fontes naturais, como erupções vulcânicas, também contribuem significativamente para sua emissão (San martin;

San Martin, 2020). Em ambientes urbanos e industriais, as principais fontes antropogênicas incluem atividades industriais, geração de energia e transporte.

No ambiente, é um precursor de poluentes secundários como partículas finas ( $MP_{2,5}$ ) e aerossóis ácidos, que agravam a poluição atmosférica. Na saúde humana, concentrações elevadas de  $SO_2$  podem causar irritação das vias respiratórias, agravamento de doenças pulmonares crônicas, como asma, e aumento da mortalidade por condições respiratórias. Grupos vulneráveis, como crianças, idosos e indivíduos com comorbidades, são os mais afetados (*World Health Organization*, 2005).

Além disso, o  $SO_2$  contribui para fenômenos como a chuva ácida, que impacta negativamente os ecossistemas terrestres e aquáticos, causando a acidificação de solos e corpos d'água, bem como danos à vegetação. Essas consequências fazem do  $SO_2$  um alvo prioritário para regulamentações ambientais e estratégias de mitigação. Compreender as fontes, características e impactos do  $SO_2$  é crucial para avaliar os riscos associados à poluição atmosférica. Regulamentações globais, como aquelas estabelecidas pela OMS, buscam controlar suas emissões, ressaltando a importância de esforços contínuos para reduzir sua presença na atmosfera e mitigar os danos associados.

#### 4.2.3 Dióxido de Nitrogênio

O dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) é um poluente atmosférico relevante pertencente à família dos óxidos de nitrogênio. Este composto químico gasoso, formado por um átomo de nitrogênio e dois átomos de oxigênio, é emitido predominantemente por processos de combustão em veículos automotores, indústrias e usinas de energia. Sua presença na atmosfera urbana é uma preocupação crescente, devido aos seus impactos adversos tanto no meio ambiente quanto na saúde humana (*World Health Organization*, 2022).

O  $NO_2$  é formado principalmente pela oxidação do monóxido de nitrogênio (NO) em ambientes ricos em compostos orgânicos voláteis (COVs), sob a influência de luz solar. Esse processo não só intensifica a poluição do ar nas áreas urbanas como também está associado à formação de poluentes secundários, como partículas finas ( $MP_{2,5}$ ) e ozônio troposférico, aumentando a complexidade do gerenciamento da qualidade do ar (Krotkov et al., 2019). Adicionalmente, o  $NO_2$  é

um indicador de emissões provenientes de fontes antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis.

No contexto da saúde pública, o dióxido de nitrogênio é amplamente reconhecido como um agente que agrava doenças respiratórias e cardiovasculares. Exposições prolongadas podem levar ao desenvolvimento de asma, bronquite crônica e aumentar o risco de infecções respiratórias em crianças e idosos. Além disso, o NO<sub>2</sub> contribui indiretamente para impactos globais ao intensificar a formação de poluentes como o ozônio, que afeta ecossistemas, reduz a produtividade agrícola e acelera o desgaste de materiais construídos (MMA, 2019).

Compreender a dinâmica do NO<sub>2</sub> na atmosfera e os seus efeitos em diferentes escalas é essencial para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação da poluição. A legislação ambiental, ao estabelecer limites de emissão, visa não apenas proteger a saúde humana, mas também minimizar os danos ambientais causados por este poluente. Investimentos em tecnologias limpas e estratégias de monitoramento têm se mostrado fundamentais para reduzir as concentrações de NO<sub>2</sub>, especialmente em áreas urbanas.

#### **4.2.4 Monóxido de Carbono**

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e altamente tóxico, formado predominantemente durante a combustão incompleta de materiais contendo carbono, como madeira, carvão e combustíveis fósseis. Este poluente atmosférico é emitido por fontes naturais, como vulcões e incêndios florestais, e antropogênicas, incluindo veículos automotores e processos industriais. Apesar de sua rápida dispersão na atmosfera, o CO desempenha um papel significativo na química atmosférica, contribuindo para a formação de ozônio troposférico e outros compostos nocivos (*World Health Organization*, 2021; *BMJ*, 2023).

Quimicamente, o CO é classificado como um poluente primário devido à sua emissão direta na atmosfera. Ele atua como um intermediário em diversas reações químicas, sendo um redutor potente que influencia os ciclos biogeoquímicos globais. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, os padrões de qualidade do ar estabelecem limites rigorosos para o CO devido aos seus efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente (*World Health Organization*, 2021).

A exposição ao monóxido de carbono, mesmo em baixas concentrações, pode causar efeitos adversos à saúde, como tontura, fadiga e, em níveis elevados, asfixia devido à formação de carboxi-hemoglobina no sangue. Além disso, sua presença em áreas urbanas está associada a um aumento nos casos de doenças cardiovasculares e respiratórias. O impacto ambiental do CO se dá pela sua contribuição indireta para o aquecimento global e acidificação do solo, devido à interação com outros poluentes e processos atmosféricos (BMJ, 2023; GHRP, 2023).

Em síntese, o monóxido de carbono representa um desafio ambiental e de saúde pública, exigindo esforços coordenados para sua redução. Medidas como o uso de tecnologias de combustão limpa, regulamentações rigorosas de emissões veiculares e campanhas de conscientização são fundamentais para mitigar seus efeitos. A compreensão e o monitoramento contínuo deste poluente são cruciais para garantir um ambiente mais saudável e sustentável para as futuras gerações (BMJ, 2023; *World Health Organization*, 2021).

#### **4.2.5 Ozônio**

O ozônio ( $O_3$ ) é uma molécula triatômica composta por três átomos de oxigênio e apresenta um papel essencial tanto na estratosfera quanto na troposfera. Sua formação natural ocorre pela interação da radiação ultravioleta solar com o oxigênio molecular ( $O_2$ ), um processo que resulta na geração de átomos de oxigênio (O), os quais posteriormente se combinam com moléculas de  $O_2$  para formar o ozônio. Essa dinâmica torna o  $O_3$  uma entidade química fundamental em diversos processos atmosféricos (Ministério de Meio Ambiente, 2019; *World Health Organization*, 2022).

Na estratosfera, o ozônio compõe a chamada "camada de ozônio", um elemento crítico na absorção da radiação ultravioleta (UV-B) prejudicial proveniente do Sol. Este processo protege organismos vivos contra danos genéticos e outros impactos nocivos causados por essa radiação. Já na troposfera, o ozônio é formado secundariamente a partir de reações fotoquímicas envolvendo precursores como óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) e compostos orgânicos voláteis (COVs), frequentemente associados a atividades antropogênicas. Este ozônio troposférico é um dos principais constituintes do *smog* fotoquímico, afetando a qualidade do ar em áreas urbanas (Ministério de Meio Ambiente, 2019).

O impacto do ozônio na saúde humana e ambiental é duplo. Na troposfera, concentrações elevadas de  $O_3$  estão associadas a irritações respiratórias, redução da função pulmonar, agravamento de doenças crônicas, e impactos cardiovasculares. Além disso, o ozônio pode danificar plantas, reduzindo a produtividade agrícola, e prejudicar ecossistemas naturais. Já na estratosfera, a redução da camada de ozônio, conhecida como "buraco na camada de ozônio", tem implicações graves, como aumento dos casos de câncer de pele e catarata, além de alterações nos ciclos biológicos (*World Health Organization*, 2022).

A regulação das emissões de precursores do ozônio troposférico e a preservação da camada de ozônio estratosférico são prioridades ambientais globais. Políticas públicas, como a implementação do Protocolo de Montreal, têm sido fundamentais para controlar o uso de substâncias que destroem o ozônio, enquanto estratégias de redução de  $NO_x$  e COVs visam mitigar os impactos do  $O_3$  troposférico. Compreender o comportamento dual do ozônio é essencial para o desenvolvimento de medidas que promovam a sustentabilidade e a saúde pública.

#### **4.3 Fontes de Emissão**

As fontes de emissão correspondem a toda descarga de poluentes lançada na atmosfera, podendo ocorrer por meio de dispositivos de exaustão, superfícies industriais, chaminés residenciais e sistemas de transporte, como veículos automotores e aeronaves (EPA, 1992). Conforme o Decreto nº 8.468/1976, essas fontes abrangem atividades e operações móveis ou fixas que impactam direta ou indiretamente o meio ambiente.

As fontes de emissão atmosférica podem ser classificadas em fixas e móveis, de acordo com sua localização e natureza. As fontes fixas referem-se a instalações que geram emissões em pontos ou áreas definidas, como indústrias metalúrgicas, químicas e alimentícias, usinas de geração de energia elétrica, aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (ETEs). Também estão incluídas as emissões provenientes da queima de biomassa e resíduos agrícolas, frequentemente relacionadas a práticas agrícolas ou gestão de resíduos.

Por outro lado, as fontes móveis correspondem às emissões originadas de veículos e equipamentos em movimento. Exemplos incluem veículos automotores, como carros, caminhões e ônibus, locomotivas ferroviárias, embarcações marítimas

e fluviais, além de aeronaves. Esses diferentes tipos de fontes contribuem significativamente para a liberação de poluentes específicos na atmosfera, exigindo estratégias distintas para monitoramento e controle.

Cada tipo de fonte está associado a diferentes poluentes atmosféricos. Por exemplo, as fontes móveis contribuem significativamente para a emissão de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>). Já as fontes fixas, como indústrias e usinas de energia, são responsáveis por emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (COVs), além de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2022), a categorização precisa das fontes e a identificação dos poluentes associados são essenciais para o monitoramento e controle da poluição atmosférica. Essa abordagem é fundamental para o desenvolvimento de políticas públicas que visem a mitigação de impactos ambientais e a proteção da saúde humana.

#### **4.4 Monitoramento da qualidade do ar**

No Brasil, a partir dos anos 80 iniciou-se a implementação de políticas públicas voltadas à gestão da qualidade do ar, por intermédio da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e da regulamentação acerca do estabelecimento de padrões Nacionais de Qualidade do Ar. Referindo-se a uma parte da estratégica do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR (Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2014). Com isso, servindo como instrumentos complementares e referenciais ao PRONAR; e tendo como referências a aplicação dos valores guia de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde (2005) e seus critérios de implementação.

O Ministério do Meio Ambiente, através da publicação do “Guia Técnico para monitoramento e avaliação da Qualidade do Ar”, estabelece diretrizes e orientações para a atuação dos órgãos ambientais estaduais e distritais em relação às ações de monitoramento da qualidade do ar. Essas diretrizes incluem a elaboração de relatório e subsequente publicação dos índices e da avaliação de qualidade do ar (IQAR) (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2018).

Dentro desse cenário, a Resolução CONAMA nº 491 de 2018 preconiza que cada estado brasileiro adote normativas específicas para a instalação de instrumentos de monitoramento da qualidade do ar. Com isso, ocorrem consideráveis discrepâncias no tocante à quantidade de dispositivos, tipos de poluentes monitorados e transparência na divulgação dos dados à sociedade.

No Brasil, os parâmetros de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que substituiu a Resolução CONAMA nº 3/1990 (Ministério do Meio Ambiente, 2022). A resolução nº 491/2018 define os padrões de qualidade do ar como instrumentos de gestão ambiental. Além disso, estabelece parâmetros relacionados tanto aos níveis de concentração de determinados poluentes na atmosfera, quanto aos intervalos de exposição. Essas medidas visam preservar o meio ambiente e a saúde da população diante dos impactos causados pela poluição atmosférica.

Desta forma, os parâmetros são regulamentados pela legislação ambiental, sendo os subsequentes: as partículas totais em suspensão (PTS), a fumaça, as partículas inaláveis ( $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ ), o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), o monóxido de carbono (CO), o ozônio ( $O_3$ ), o dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) e o chumbo (Pb) (MMA, 2022). No Quadro 3 apresentam-se os padrões nacionais de Qualidade do Ar.

Quadro 3:- Padrões Nacionais de Qualidade do Ar<sup>2</sup>

<b>Poluente Atmosférico</b>	<b>Período de referência</b>	<b>PI-1 µg\m³</b>	<b>PI-2 µg\m³</b>	<b>PI-3 µg\m³</b>	<b>PF µg\m³</b>	<b>PPM</b>
Material Particulado MP <sub>10</sub>	24 horas Anual <sup>1</sup>	120 40	100 35	75 30	50 20	-
Material Particulado MP <sub>2,5</sub>	24 horas Anual <sup>1</sup>	60 20	50 17	37 15	25 10	-
Dióxido de Enxofre SO <sub>2</sub>	24 horas Anual <sup>1</sup>	125 40	50 30	30 20	20	-
Dióxido de Nitrogênio NO <sub>2</sub>	1 hora 2 Anual <sup>1</sup>	260 60	240 50	220 45	200 40	-
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 horas Anual <sup>1</sup>				240 80	
Fumaça	24 horas Anual <sup>1</sup>	120 40	100 35	75 30	50 20	
Ozônio O <sub>3</sub>	8 horas <sup>3</sup>	140	130	120	100	
Monóxido de Carbono CO	8 horas <sup>3</sup>					9
Chumbo - Pb5	Anual <sup>1</sup>				0,5	

Fonte: Adaptado Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2018.

No Estado do Rio Grande do Sul, o órgão responsável pelo monitoramento é a Fundação Nacional de Proteção ao Meio Ambiente Henrique Luís Roessler – RS (FEPAM), por meio de uma rede de estações automáticas (Rede AR DO SUL) que monitora a qualidade do ar, conforme mostra o quadro 4.

<sup>2</sup> (1 - média aritmética anual; 2 - média horária; 3 - máxima média móvel obtida no dia; 4 - média geométrica anual; 5 - medido nas partículas totais em suspensão (ppm); PF- Padrão de qualidade do ar final; PI - Padrões de qualidade do ar intermediários; PI-1 – Primeira etapa que entra em vigor a partir da publicação da Resolução; PI-2; PI-3 e PF- Serão adotados de forma subsequente).

Quadro 4:- Municípios com monitoramento no Estado do RS.

<b>Município</b>	<b>Estação</b>	<b>Parâmetros de Monitoramento</b>
Porto Alegre	Centro /Rodoviária	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub> e Parâmetros Meteorológicos
Porto Alegre	Santa Cecília /Escola de Bombeiros	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub>
Porto Alegre	Jardim Botânico /ESEF	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub>
Canoas	V COMAR	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>
Canoas	Parque Universitário	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NOx, O <sub>3</sub> , CO, Hidrocarbonetos e Parâmetros Meteorológicos
Sapucaia do Sul	SESI	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub> e Parâmetros Meteorológicos
Triunfo	Pólo Petroquímico	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub>
Triunfo	DEPREC	SO <sub>2</sub> , NOx
Triunfo	Pólo Petroquímico/ Móvel	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub> e Parâmetros Meteorológicos
Caxias do Sul	SENAI	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> e Parâmetros Meteorológicos
Gravataí	Condomínio Jardim Timbaúva	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NOx, O <sub>3</sub> , CO, Hidrocarbonetos e Parâmetros Meteorológicos
Charqueadas	Arranca Toco	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NOx, O <sub>3</sub> , CO
Guaíba	Parque 35	PI <sub>10</sub> , PTS, SO <sub>2</sub> , CO, NOx, TRS, O <sub>3</sub> e Parâmetros Meteorológicos
Diversos	Circula pelo Estado	PI <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, NOx, O <sub>3</sub> e Parâmetros Meteorológicos
Candiota (2 un.)	CGTEE/Usina Temoe-létrica Presidente Médici	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> e Partículas Inaláveis (PM <sub>10</sub> )
Hulha Negra	-	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> e Partículas Inaláveis (PM <sub>10</sub> )
Colônia Nova	-	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> e Partículas Inaláveis (PM <sub>10</sub> )
Pedras Altas	-	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> e Partículas Inaláveis (PM <sub>10</sub> )
Pinheiro Machado	-	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> e Partículas Inaláveis (PM <sub>10</sub> )
Bagé	-	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> e Partículas Inaláveis (PM <sub>10</sub> )

Fonte: FEPAM, 2022.

Nessas estações há dispositivos que operam por métodos físico-químicos para analisar automaticamente o ar conforme ele é amostrado. Os dados gerados são enviados para a Central de Monitoramento Online da Qualidade do Ar e Meteorologia. O Quadro 5 apresenta os métodos de medição para cada poluente monitorado.

Quadro 5 - Métodos de medição dos poluentes na Rede Automática

Poluente	Método de medição
Partículas Inaláveis - PI <sub>10</sub>	Radiação Beta ou Micro-balança oscilante
Dióxido de Enxofre - SO <sub>2</sub>	Fluorescência - Ultravioleta
Monóxido de Carbono - CO	Infravermelho não-dispersivo
Óxidos de Nitrogênio - NOx	Quimiluminescência
Ozônio - O <sub>3</sub>	Ultravioleta

Fonte: FEPAM, 2022.

Como possibilidade de complementação e ampliação do monitoramento da qualidade do ar vigente tem-se empregado os biondicadores ambientais. Esta tem sido uma metodologia adicional adequada para a detecção de efeitos dos poluentes atmosféricos, além de contribuir para informações adicionais sobre seus efeitos nos organismos (Klump, 2001). Além disso, tem-se buscado o aprimoramento de estações de qualidade do ar de baixo custo, através da aplicação de sensores de baixo custo (MP, O<sub>3</sub>, temperatura e umidade) associados a uma plataforma Arduino (Galetti et al., 2020).

#### 4.5 Efeitos da poluição atmosférica na saúde humana

Há décadas, a Organização Mundial da Saúde vem discutindo os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana. O ar limpo é considerado um requisito básico para o bem estar e saúde humana, mas a poluição atmosférica continua configurando uma ameaça para a saúde mundial (*World Health Organization*, 2005).

Em 2021, a OMS publicou novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar (AQG). Essas diretrizes apresentam evidências claras de que a poluição do ar prejudica a saúde humana, mesmo em concentrações mais baixas do que se estimava anteriormente. Além disso, recomendam novos limites para os principais poluentes atmosféricos, visando proteger a saúde pública e combater os efeitos da mudança climática (Organização Mundial de saúde, 2021).

Evidências científicas vêm estabelecendo vínculos entre a exposição ao material particulado e uma ampla gama de condições de saúde. Além das doenças respiratórias, como asma e bronquite, os impactos incluem doenças cardiovasculares, alterações imunológicas e até complicações metabólicas, ampliando os desafios de saúde pública associados à poluição atmosférica.

Santos et al. (2020) investigaram detalhadamente os impactos da poluição atmosférica sobre a saúde humana, destacando a forte correlação com diversas comorbidades respiratórias. Entre as condições citadas estão infecções respiratórias como asma, rinite, bronquite, sinusite e pneumonias, com maior prevalência em crianças e idosos. Além disso, os autores associaram a exposição à poluição a problemas cardiovasculares, câncer de pulmão e comprometimentos no desenvolvimento fetal, incluindo restrição de crescimento intrauterino, nascimentos prematuros, anomalias congênitas e óbitos perinatais. Essas descobertas reforçam a necessidade de ações para mitigar a poluição e proteger a saúde das populações vulneráveis.

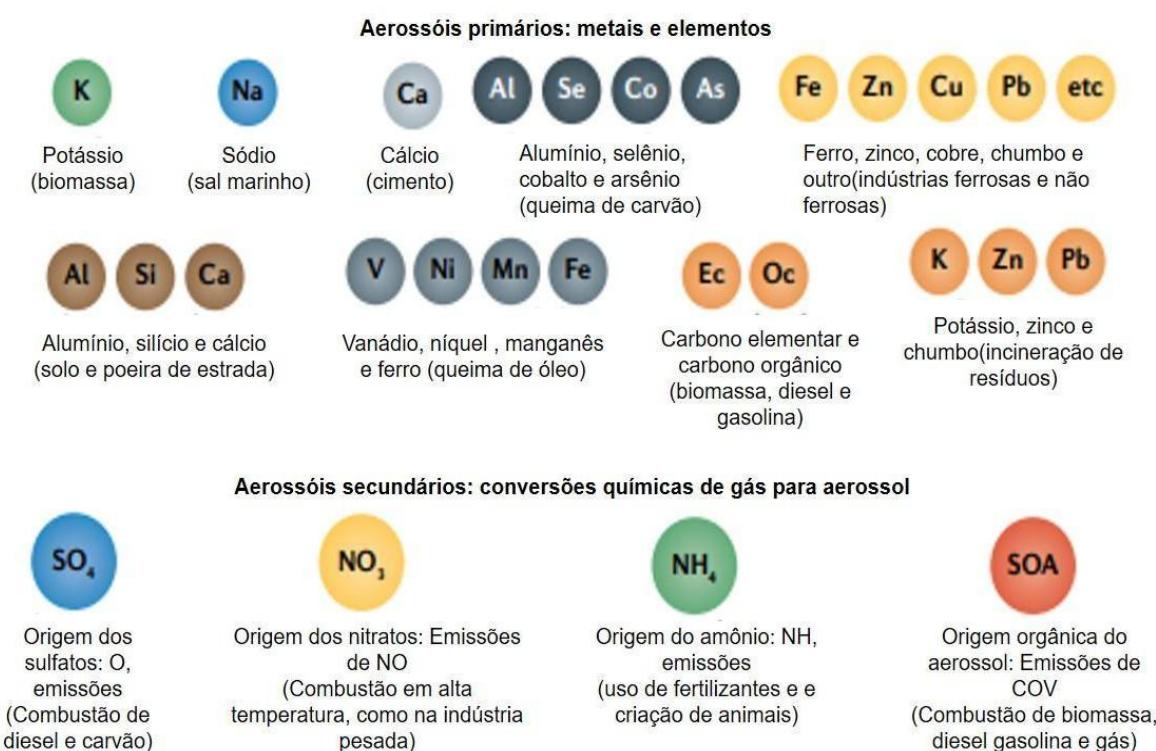
Rao et al. (2018) investigaram os impactos do material particulado (MP) e destacaram sua toxicidade, atribuindo danos oxidativos diretos às vias aéreas e tecidos pulmonares, além de desencadear processos inflamatórios no pulmão. Elementos presentes no MP, como metais pesados e compostos orgânicos, desempenham um papel crucial nesses efeitos adversos. Estudos realizados por Daiber et al. (2020) e Al-Kindi et al. (2020) também destacam evidências clínicas e experimentais sólidas sobre os efeitos nocivos do material particulado (MP) na saúde humana.

Daiber et al. (2020) revelam que a exposição aguda e crônica ao MP está associada a inflamação sistêmica e estresse oxidativo, fatores que promovem doenças cardiovasculares, como acidente vascular cerebral (AVC) e doença isquêmica do coração. Além disso, esses mecanismos contribuem para a aceleração

de condições que precedem doenças neurodegenerativas, ampliando os impactos à saúde pública.

Al-Kindi et al. (2020) enfatizam a toxicidade dos metais pesados presentes na composição do MP, destacando sua capacidade de agravar os efeitos prejudiciais do material particulado. Esses metais, mesmo em baixas concentrações, são altamente tóxicos para os seres vivos, acumulando-se ao longo da cadeia alimentar e aumentando os riscos ambientais e biológicos. Os autores esquematizaram a presença de metais em aerossóis primários e secundários conforme mostra a Figura 3. Esses achados reforçam a necessidade de estratégias de controle e mitigação da poluição atmosférica para proteger a saúde humana e ambiental.

Figura 3 - Metais pesados presentes em aerossóis primários e secundários



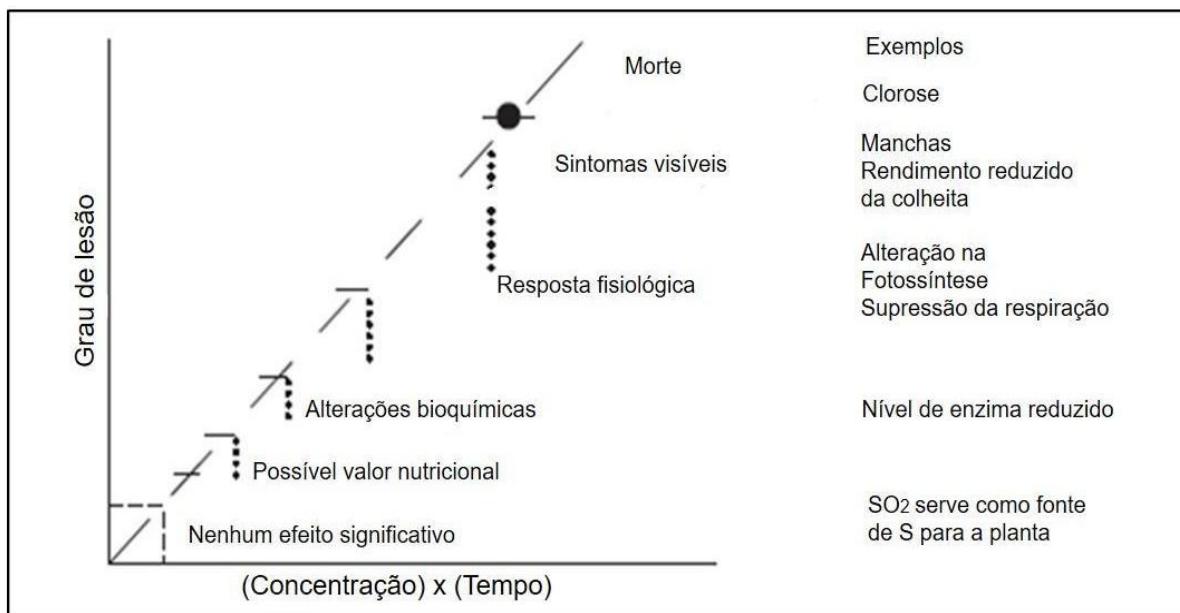
Fonte: Al-Kindi et al. (2020).

#### 4.6 Interações dos poluentes atmosféricos com as plantas

Os efeitos da poluição do ar são perceptíveis nas plantas de forma semelhante aos seres humanos, causando alterações fisiológicas e estruturais. Esses impactos variam de acordo com fatores como espécie, idade, nutrição,

condições do solo, temperatura, umidade e luz solar (Vallero, 2008). Conforme aumenta o nível de exposição a poluição do ar surgem alterações bioquímicas, fisiológicas, sintomas visíveis como danos às folhas, e, em casos extremos, a morte das plantas. A Figura 4 apresenta o espectro de resposta biológica das plantas à poluição atmosférica, destacando como a interação entre a concentração de poluentes e o tempo de exposição afeta a saúde vegetal em diferentes níveis.

Figura 4 - Espectro de resposta biológica das plantas à poluição atmosférica



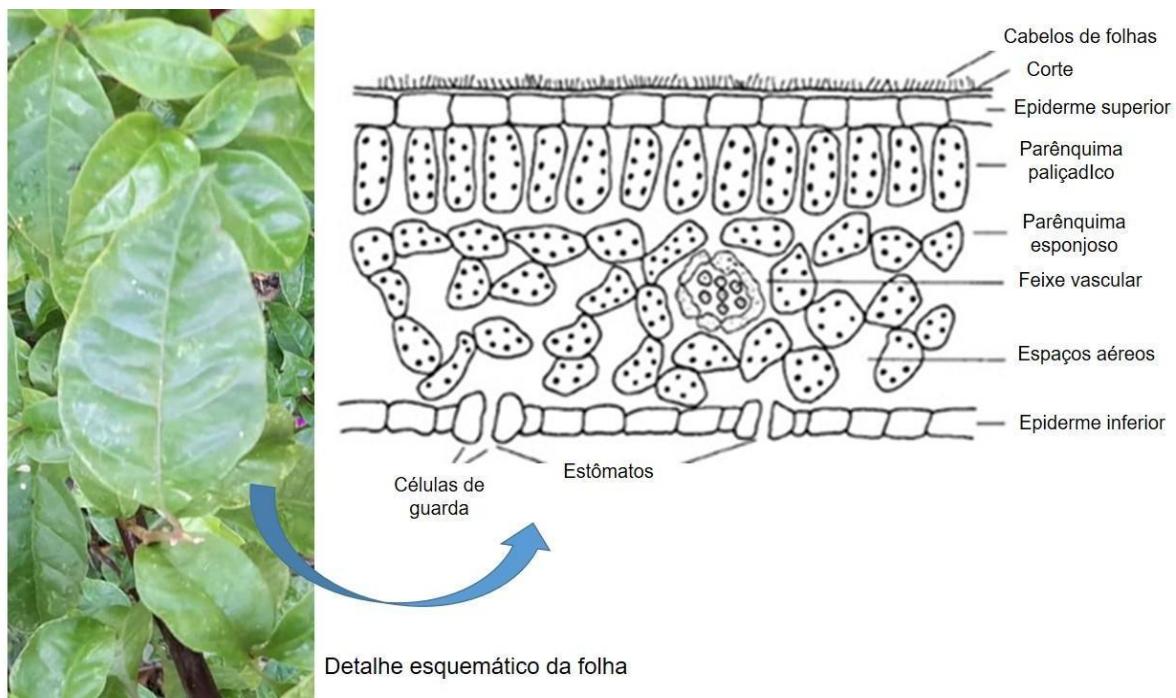
Fonte: Vallero (2008).

As folhas das plantas desempenham um papel fundamental como superfície de deposição e absorção de poluentes atmosféricos, incluindo partículas suspensas e gases. A elevada velocidade de deposição das partículas transportadas pelo ar favorece seu acúmulo na superfície foliar (Roupsard et al., 2013), indicando que uma parcela significativa dos poluentes pode se fixar na vegetação. Além disso, a própria estrutura vegetal possui a capacidade de absorver compostos poluentes presentes na atmosfera, como material particulado (MP) e monóxido de carbono (CO), contribuindo para a mitigação da poluição ambiental (Fantozzi et al., 2015; Janhall, 2015).

Os poluentes atmosféricos impactam as plantas ao reduzir a penetração da luz solar, comprometendo a fotossíntese tanto pela deposição de partículas sobre as folhas quanto pela interferência das partículas suspensas na atmosfera. Além disso,

essas substâncias podem ser distribuídas diretamente pelos estômatos, afetando processos fisiológicos essenciais. Os efeitos resultantes podem ser tanto visíveis quanto não visíveis, sendo que os sintomas perceptíveis incluem danos ao tecido foliar, clorose (alteração na coloração normal das folhas) e mudanças no crescimento.

Figura 5: Esquema Anatômico de Folha



Fonte: Adaptado de Vallero (2008).

Ao observar a anatomia das folhas, é possível destacar diversas interações com os poluentes atmosféricos devido às suas estruturas específicas. A cutícula é uma camada cerosa que cobre a superfície das folhas e atua como uma barreira protetora contra poluentes, limitando a penetração de gases e partículas. Já os tricomas (pêlos) podem ajudar na retenção de partículas atmosféricas, funcionando como filtros que capturam material particulado antes que ele alcance os estômatos ou penetre na folha (Bewley, 1997).

Os estômatos são aberturas reguláveis localizadas principalmente na epiderme inferior da folha. Eles permitem a troca gasosa, sendo a principal via de entrada de gases poluentes, como dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ). Quando os poluentes entram pelos estômatos, podem causar

danos aos tecidos internos, como alterações bioquímicas e perda da capacidade fotossintética (Oliveira et al., 2021).

As camadas internas são responsáveis pela fotossíntese e pela circulação de gases. A presença de poluentes pode interferir nesses processos, especialmente se os gases tóxicos ou partículas depositadas afetarem a difusão de luz ou as reações químicas essenciais (Casaroli et al., 2007). Certas plantas possuem a capacidade de atuar como biofiltros naturais, absorvendo e metabolizando poluentes, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e alguns compostos orgânicos voláteis (VOCs), reduzindo a concentração desses elementos no ambiente (Cirillo et al., 2015).

Além disso, poluentes sólidos em suspensão, como material particulado ( $\text{MP}_{10}$  e  $\text{MP}_{2,5}$ ), podem se acumular na superfície das folhas, reduzindo a absorção de luz necessária para a fotossíntese (Kling et al., 2018). Em casos severos, isso pode levar à diminuição do crescimento das plantas e à redução de produtividade agrícola. Em síntese, a anatomia das folhas desempenha um papel central tanto na absorção quanto na proteção contra os efeitos dos poluentes atmosféricos, sendo um indicador importante para estudar os impactos ambientais em ecossistemas e áreas urbanas (Vallero, 2008).

Fatores abióticos, como água, luz e calor, desempenham papel crucial na resposta das plantas à poluição. O estresse hídrico, resultante da baixa disponibilidade de água no solo ou da restrição no fornecimento, pode limitar funções fisiológicas essenciais. Plantas adaptam-se a essas condições por meio do controle estomático e ajustes osmóticos em situações extremas (Cameron et al., 2006; Cirillo et al., 2015). A luz solar também é essencial, mas apenas cerca de 1,3% da radiação que atinge a atmosfera é utilizada pelas plantas na fotossíntese. Em áreas urbanas, grande parte da radiação não contribui para processos vegetais devido à descontinuidade nas comunidades vegetais (Casaroli et al., 2007; Taiz et al., 2008).

As mudanças sazonais de temperatura e luz têm efeitos combinados nas respostas das plantas à poluição atmosférica. A maior incidência de luz e temperaturas mais altas no verão pode intensificar o estresse das plantas, enquanto a menor luz e temperaturas mais baixas no inverno podem reduzir a fotossíntese e a capacidade de mitigação dos danos causados pela poluição, mas, ao mesmo tempo, aumentar a concentração de poluentes no ambiente (Kerbauy, 2004). A relação entre temperatura, luz e a resposta das plantas à poluição atmosférica pode ser

explicada pela interação complexa desses fatores, que influenciam diretamente o metabolismo e o bem-estar das plantas (Bewley et al., 1994).

No verão, com temperaturas mais altas e maior incidência de luz solar, as plantas experimentam uma aceleração de seus processos metabólicos, como a fotossíntese. Esse aumento de atividade também pode tornar as plantas mais vulneráveis aos poluentes atmosféricos. O ozônio ( $O_3$ ), por exemplo, é mais ativo em temperaturas elevadas e pode penetrar pelas folhas mais facilmente devido à maior abertura dos estômatos para troca gasosa, exacerbando o estresse oxidativo e os danos celulares (Larcher, 2003). Além disso, a maior radiação solar aumenta a produção de radicais livres nas folhas, o que potencializa os danos causados por poluentes como o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ).

Por outro lado, durante o inverno, a redução na temperatura e na luz solar diminui a atividade fotossintética das plantas e também a taxa de troca gasosa nos estômatos. Isso pode reduzir a absorção de poluentes, mas também diminui a capacidade das plantas de lidar com os danos (Kerbauy, 2004). O frio pode causar uma diminuição no metabolismo das plantas e afetar sua capacidade de se regenerar após os danos causados por poluentes acumulados no período mais quente (Pang et al., 2020). O acúmulo de poluentes como o material particulado (MP), por exemplo, pode ser mais evidente no inverno, quando as condições meteorológicas favorecem o "encaixotamento" de poluentes na atmosfera, criando uma camada de poluição mais espessa que as plantas não conseguem dissipar facilmente.

A temperatura também influencia a distribuição e a dispersão de poluentes na atmosfera. Durante os meses mais quentes, a maior movimentação de ar pode ajudar a dispersar os poluentes, enquanto no inverno, a inversão térmica pode prender poluentes próximos ao solo, tornando as plantas mais suscetíveis a uma exposição prolongada (Kling et al., 2018). Esse fenômeno é particularmente perigoso para áreas urbanas, onde a poluição do ar é mais intensa e a vegetação, muitas vezes, está exposta a essas condições por mais tempo.

Diferentes poluentes atmosféricos impactam as plantas de maneira variada. Fluoretos, mesmo em concentrações baixas, podem reduzir a fotossíntese e causar morte celular nas folhas antes que os danos sejam visíveis. Outros poluentes, como cloro, amônia e ácidos clorídrico e sulfúrico, também causam danos significativos à

vegetação (Begon et al., 2006). Já o material particulado tem sido associado a estresse oxidativo e impactos metabólicos severos nas plantas.

Apesar dos impactos negativos, a vegetação desempenha papel relevante na mitigação da poluição atmosférica. Estudo de Zheng et al. (2021) demonstrou que plantas próximas a rodovias reduzem concentrações de material particulado no ar, destacando sua importância no planejamento urbano para atenuar os efeitos da poluição por emissões automobilísticas. Assim, a vegetação pode ser uma ferramenta eficaz no combate à poluição em ambientes urbanos.

#### **4.7 Bioindicadores ambientais**

Bioindicadores ambientais são organismos que podem interagir com a contaminação ambiental através de modificações, deformações, reações específicas ou variações em sua fisiologia e através de sua capacidade de acumulação de poluentes (Anze et al., 2007). Os bioindicadores ambientais são empregados em processos de biorremediação, a qual é uma metodologia aplicada para remediar concentrações de poluentes, seja na água como no solo, através do uso de organismos vivos, como microrganismos, plantas ou enzimas, de modo a reduzir ou remover estes teores do ambiente. Os organismos podem ser pré-existentes ou ser inseridos no local contaminado (método passivo ou ativo). A capacidade natural dos organismos em degradarem ou reduzirem as substâncias tóxicas é aproveitada para reduzir os níveis de toxicidade do ar atmosférico (Fink; Tiecher, 2017).

Prestes e Vicenci (2019) destacam o uso de bioindicadores ambientais como uma ferramenta eficaz para avaliar o impacto ambiental, mencionando a diversidade de organismos utilizados, como líquens, musgos, macrofauna do solo, peixes e organismos aquáticos, além de plantas. Esses bioindicadores são capazes de responder às alterações ambientais causadas por ações humanas, refletindo a saúde dos ecossistemas.

Os bioindicadores vegetais desempenham um papel crucial no monitoramento ambiental ao refletirem as condições adversas às quais estão expostos, como poluição e alterações climáticas. Um dos principais mecanismos fisiológicos que relaciona os impactos ambientais às respostas dessas plantas é o estresse oxidativo. Esta resposta ocorre quando há um desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e a capacidade antioxidante da planta. Esse

fenômeno evidencia os danos causados por poluentes como metais pesados, ozônio e material particulado, e também fornece uma ferramenta valiosa para avaliar e mitigar os efeitos da poluição no meio ambiente. Dessa forma, a análise do estresse oxidativo em bioindicadores vegetais contribui significativamente para a conservação ambiental e a promoção da saúde pública.

#### **4.7.1 Estresse oxidativo nas plantas**

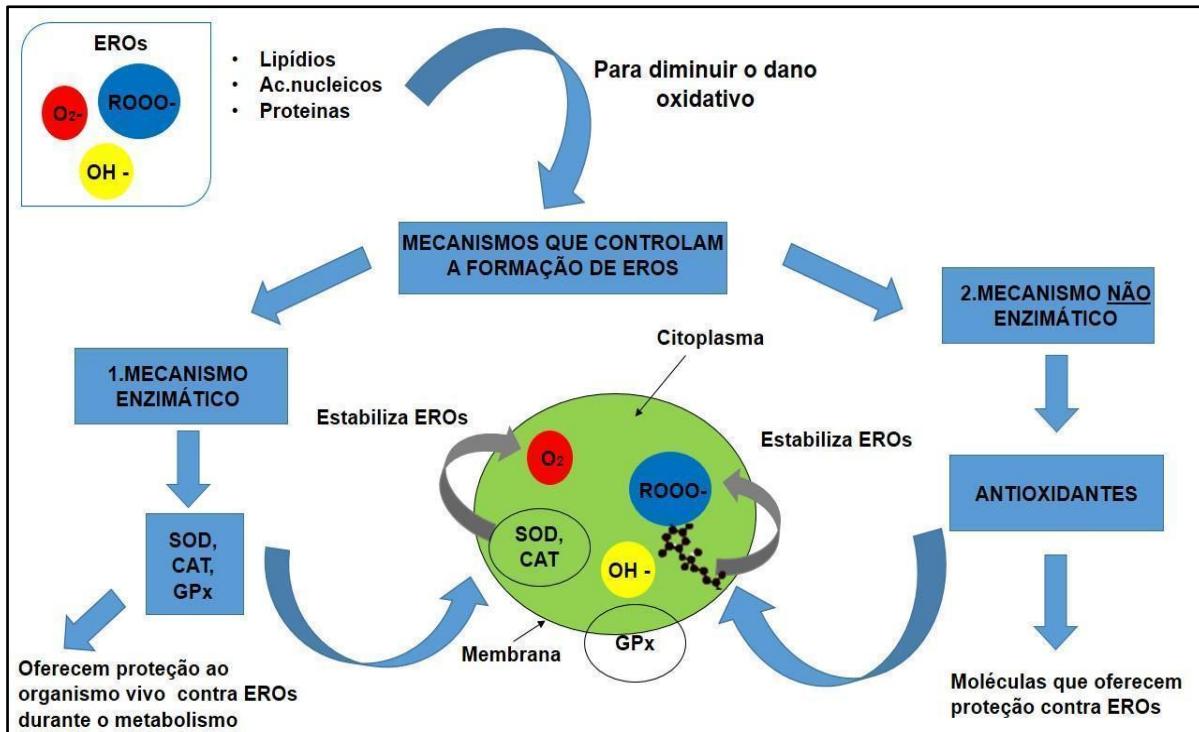
A oxidação, definida como a adição de oxigênio ou remoção de elétrons de uma molécula, é um processo químico essencial que ocorre em diversos contextos, desde a decomposição de resíduos orgânicos até reações celulares vitais (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1992). Este fenômeno está intimamente relacionado à geração de espécies reativas de oxigênio (ERO) e ao desequilíbrio redox responsável pelo estresse oxidativo em plantas.

O estresse oxidativo em plantas é definido como um desequilíbrio entre agentes oxidantes e antioxidantes em favor dos oxidantes, resultando em alterações na sinalização redox e potencial dano molecular (Sies, 2019). Essa condição pode ser induzida por diversos agentes, como fatores químicos, físicos e microbianos, que promovem a oxidação celular. Processos vitais como a respiração celular, síntese lipídica e metabolismo de metais são exemplos naturais onde ocorrem reações de oxidação (Gagné, 2014).

As espécies reativas de oxigênio (ERO) desempenham um papel central no estresse oxidativo. Essas moléculas altamente reativas, formadas a partir do oxigênio, podem causar danos significativos às biomoléculas celulares, especialmente quando a produção de EROs excede a capacidade antioxidante das plantas (Shankar et al., 2014; Kundu et al., 2020). Este desequilíbrio é um marcador-chave de condições ambientais adversas.

A Figura 6 apresenta os dois tipos de mecanismos antioxidantes das plantas. O mecanismo enzimático inclui enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e glutationa peroxidase (GPx), que regulam a formação e o destino das espécies reativas de oxigênio (EROs) ou substâncias tóxicas geradas pela célula. O mecanismo não enzimático envolve moléculas como glutationa e antioxidantes, incluindo vitaminas C e E, que atuam como "eliminadores" de radicais livres, neutralizando-os diretamente.

Figura 6 - Mecanismos de controle da formação de EROS



Fonte: Adaptado de Ortiz et al. (2017).

Para mitigar os efeitos do estresse oxidativo, as plantas utilizam sistemas antioxidantes, que podem ser divididos em enzimáticos e não enzimáticos. Os antioxidantes enzimáticos incluem enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e glutationa peroxidase (GPx), que atuam diretamente na neutralização das EROS. Já os antioxidantes não enzimáticos, como a glutationa e vitaminas (ex.: E e C), desempenham um papel complementar ao eliminar radicais livres e proteger as células contra oxidações excessivas (Krinsky, 1994; Martin et al., 2022).

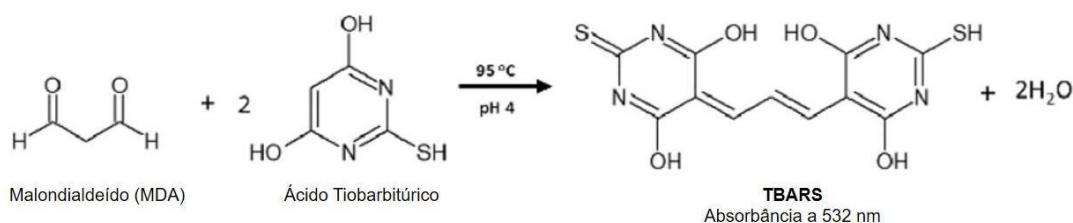
Além desses mecanismos, o estresse oxidativo pode ser identificado e quantificado por meio de marcadores específicos, como os produtos da peroxidação lipídica. A peroxidação lipídica é um processo em cadeia caracterizado pela oxidação de lipídios, iniciado quando um radical livre abstrai um elétron de uma molécula lipídica, originando um radical livre de ácido graxo (Velloso et al., 2021; Aguilar Diaz de Leon e Borges 2020). Este radical instável reage subsequentemente com outras moléculas de ácidos graxos, resultando na formação de hidroperóxidos lipídicos e na geração adicional de radicais livres de ácidos graxos, perpetuando o ciclo oxidativo (Souza et al.2021, Almeida et al.,2024).

As substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) constituem subprodutos gerados durante o processo de peroxidação lipídica, resultantes da degradação oxidativa de lipídeos. Esses compostos podem ser detectados por meio do ensaio TBARS, que emprega o ácido tiobarbitúrico como reagente específico para a formação de complexos cromogênicos mensuráveis (Aranda-Riveira et al., 2022; Almeida, 2024).

Os ensaios de TBARS quantificam tanto o malondialdeído (MDA) presente na amostra quanto o malondialdeído formado a partir de hidroperóxidos de lipídios sob condições hidrolíticas da reação (Demidchik, 2015). Aguilar Diaz de Leon e Borges (2020), descreve a reação de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico da seguinte maneira.

O bis (dimetilacetal) do malondialdeído produz malondialdeído por hidrólise catalisada por ácido hidrólise catalisada por ácido1. O malondialdeído libertado (MDA) reage então com duas moléculas de ácido 2-tiobarbitúrico (TBA) (pH = 4 e 95 °C) para formar aductos MDA-TBAR que dão uma cor vermelho-rosa e podem ser medidos espectrofotometricamente a 532 nm. Uma vez que, para além do MDA, existem outras moléculas para além do MDA, derivadas de lipídios oxidados, podem também reagir com o TBA. A medição da absorbância a 532 nm é simplesmente referida como uma medição de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico ou TBARS.( Aguilar Diaz de Leon e Borges, 2020, p. 15).

Figura 7 - Arquetipo da reação de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico.



Fonte: Adaptado Aguilar Diaz de Leon e Borges (2020).

Sendo assim, um método amplamente utilizado, por exemplo, em estudos com plantas como o sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), (Pérez-Lopez et al., 2023), feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) com relação ao crômio (Sala, 2022), o MDA foi

quantificado para avaliar os danos oxidativos sob condições adversas, demonstrando a aplicabilidade desses marcadores na análise do estresse oxidativo.

#### **4.7.2 Bioindicadores vegetais**

No estudo de Maki et al. (2013), os bioindicadores vegetais são definidos como organismos diversos usados para avaliar a qualidade ambiental. Essa avaliação pode ser ativa, quando as espécies são preparadas no ambiente antes da análise, ou passiva, quando são avaliados os seres que já habitam a área em estudo. Esses seres podem ser espécies individuais, grupos de espécies ou comunidades biológicas que, por meio de suas funções naturais, interagem com diversos fatores ambientais. Devido a essa relação, podem ser utilizados como indicadores na avaliação da qualidade ambiental de uma área específica. Os estudos apresentados no Quadro 6 destacam a importância dos bioindicadores vegetais como ferramentas essenciais para avaliar os impactos ambientais da poluição atmosférica.

Quadro 6 - Pesquisas relacionadas ao uso de vegetais como bioindicadores

Espécie/Bioindicador	Poluentes Monitorados	Local/Aplicação	Referência
<i>Nicotiana tabacum</i> (tabaco)	Ozônio ( $O_3$ )	Estudos diversos, destacando seu uso como bioindicador ativo.	Maki et al. (2013)
<i>Tradescantia pallida</i> (coração-roxo)	Monóxido de carbono (CO), Material particulado ( $MP_{10}$ ), Dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), Dióxido de enxofre ( $SO_2$ )	Brasil, biomonitoramento ativo em diferentes condições atmosféricas.	Lima et al. (2005)
<i>Lolium multiflorum</i> (azevém)	Metais pesados (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) e elementos traço (Pt, Sb, S)	Europa e estudos sobre acúmulo de metais.	VDI (1978); Peichl (1997)
Liquens e Musgos	Metais pesados (Hg, As, Cd, Cr, Pb, Cu, Ni, Al, Se, Co)	Estudos globais: Chile, EUA, Canadá e Itália	Guerrieri et al. (2020)
<i>Tillandsia recurvata</i> (Bromeliaceae)	Metais pesados	Biomonitoramento de poluição do ar em Curitiba, Brasil.	Piazzetta et al. (2019)
<i>Licania tomentosa</i> , <i>Sapindus saponaria</i> , <i>Ficus benjamina</i>	Contaminantes atmosféricos variados	Biomonitoramento passivo em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.	Leandro et al. (2018)
<i>Lygeum spartum</i> , <i>Atractylis serratuloides</i> , <i>Gymnocarpos decander</i>	Metais pesados	Proximidades de fábrica de cimento em Gabes, Tunísia.	Bayouli et al. (2021)
<i>Bougainvillea glabra</i> (primavera)	Compostos fenólicos, flavonoides, material particulado, metais	Comparação entre áreas industriais e residenciais no Egito.	Azzazy (2020)
<i>Tillandsia usneoides</i> , <i>Mangifera indica</i> , <i>Citrus sinensis</i> , <i>Daucus carota</i> , <i>Gladiolus sp</i> , <i>Sphagnum sp</i>	Controle da qualidade do ar	Controle de qualidade do ar em Camaçari, Bahia, Brasil.	Rodrigues et al. (2020)
<i>Licania tomentosa</i> , <i>Bauhinia forficata</i>	Ozônio troposférico	Diagnóstico passivo em regiões tropicais; biomonitoramento ativo em diferentes cenários.	Maioli et al. (2008)

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Pesquisas como as de Maki et al. (2013) utilizam o tabaco para monitorar a presença de ozônio ( $O_3$ ) e de Lima et al. (2005) trazem o coração-roxo como bioindicador de diversos poluentes atmosféricos. Estes estudos evidenciam as plantas como ferramentas eficientes na avaliação da qualidade do ar. No entanto, pesquisas como as de VDI (1978) e Peichl (1997) já utilizavam o azevém para avaliar o acúmulo de metais pesados, além de elementos traço como platina, antimônio e enxofre. Estas pesquisas, desenvolvidas ao longo do tempo, vem explorando as plantas como bioindicadoras em variadas tipologias de espécimes, as quais desempenham papéis significativos tanto como bioindicadoras quanto como bioacumuladoras.

Guerrieri et al. (2020) menciona a utilização de liquens e musgos como bioindicadores para poluição do ar por metais pesados. A pesquisa abrange um levantamento de literatura sobre estudos de casos destes bioindicadores aplicados em cidades como Santiago (Chile), Romênia Washington (EUA), Vale de Ossola (Itália) e Nova Escócia (Canadá). Trabalhos como os de Piazzetta et al. (2019) e Bayouli et al. (2021) demonstram a eficácia de espécies vegetais como *Tillandsia recurvata* e *Lygeum spartum* no biomonitoramento de poluentes, auxiliando na detecção de metais tóxicos que podem comprometer ecossistemas e contaminar cadeias alimentares.

Bayouli et al. (2021) analisaram o impacto do pó de cimento em plantas próximas a uma fábrica em Gabes (Tunísia), identificando espécies bioindicadoras com base no fator de bioacumulação (BF) e de translocação (TF). O estudo revelou redução significativa na diversidade e densidade de plantas devido à poluição por cimento. Espécies como esparto, cardo-de-ouro e *gymnocarpos* foram identificadas como indicadoras de metais pesados na região. Dados de estudos bibliográficos conduzidos por Rodrigues et al. (2020) indicam que as espécies barba-de-velho, coração-roxo, tabaco, mangueira, laranjeira, cenoura, palma-de-santa-rita e musgo-de-turfeira são adequadas para o monitoramento da qualidade do ar no município de Camaçari, Bahia (Brasil). Essa adaptação se deve à compatibilidade dessas espécies com as condições locais, incluindo clima, temperatura, luminosidade e características do solo, fatores que favorecem seu crescimento e sensibilidade às mudanças ambientais.

Maioli et al. (2008) analisaram o impacto de poluentes atmosféricos, com destaque para o ozônio troposférico, que alcançou concentrações de até 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

em períodos médios de 4 horas, excedendo os níveis que podem causar danos às plantas. A avaliação de parâmetros bioquímicos nas folhas das árvores tropicais (oiti e pata-de-vaca) confirmou a sensibilidade dessas espécies aos poluentes, destacando seu potencial como bioindicadoras. Além disso, estudos como os de Maki et al. (2013) e Leandro et al. (2018) enfatizam a relação entre a poluição atmosférica, como o ozônio troposférico e partículas finas, e danos fisiológicos às plantas, que podem servir como indicadores precoces de riscos à saúde humana.

Os estudos apresentados no Quadro 6 utilizam espécies amplamente distribuídas e adaptáveis como bioindicadores, promovendo ações mitigadoras em áreas urbanas e industriais. Eles destacam o papel destes bioindicadores na proteção ambiental e na saúde pública. Cabe ressaltar a pesquisa de Azzazy (2020) que avaliou a *Bougainvillea glabra* (primavera) como bioindicadora ao quantificar compostos fenólicos, flavonoides, material particulado e metais no ar, comparando zonas industrial e residencial na cidade de Sadat, Egito.

O estudo revelou maior impacto da poluição atmosférica na área industrial devido às emissões do complexo industrial. Este estudo merece destaque devido à ampla presença da espécie *Bougainvillea glabra* no sul do Brasil. No entanto, há poucos estudos envolvendo essa planta em cenários urbanos submetidos à poluição atmosférica, embora seja reconhecida como potencial bioindicadora e biorremediadora ambiental.

#### **4.7.3 *Bougainvillea glabra* Choisy**

A *Bougainvillea glabra* Choisy é uma espécie endêmica da América do Sul e foi referida pela primeira vez no Brasil no século XVIII antes de ser introduzida na Europa pelo comandante militar francês Louis Antoine de Bougainville (Soni et al., 2019). A ocorrência da *B. glabra* é citada em países como a Bolívia, Bangladesh, Colômbia, Costa Rica, Cuba, China, Egito, Espanha, Equador, El Salvador, Estados Unidos da América, França, Filipinas, Guatemala, Honduras, Havaí, Ilhas Virgens, Itália, Índia, Israel, Madagascar, México, Nicarágua, Nigéria, Porto Rico, República Dominicana, Tailândia e Venezuela (Abarca-Vargas et al., 2018). Este mesmo autor realizou uma revisão abrangendo os aspectos fitoquímicos, farmacológicos e toxicológicos da *B. glabra* e destaca:

O gênero *Bougainvillea* é um grupo muito difundido em todo o mundo. Ele pertence à família *Nyctaginaceae* e, de acordo com a "The Plant List", contém aproximadamente 18 espécies (*B. berberidifolia*, *B. buttiana*, *B. campanulata*, *B. glabra*, *B. herzogiana*, *B. infesta*, *B. lehmanniana*, *B. lehmannii*, *B. malmeana*, *B. modesta*, *B. pachyphylla*, *B. peruviana*, *B. pomacea*, *B. praecox*, *B. spectabilis*, *B. spinosa*, *B. stipitata*, e *B. trollii*). Apenas quatro espécies (*B. buttiana*, *B. glabra*, *B. spectabilis* e *B. peruviana*) são exploradas comercialmente (Abarca-Vargas et al., 2018, p.1-17).

A espécie é conhecida popularmente como Primavera, Três-Marias, Roseira-do-mato, sendo uma planta ornamental comumente cultivada em jardins tropicais e subtropicais pelo mundo que costuma ser cultivada como arbusto ou trepadeira (Ahmed, 2014, p. 73). A *Bougainvillea glabra* é uma planta conhecida por sua beleza ornamental. Seus atributos estéticos são indicativos das diversas propriedades e características biológicas que essa espécie vegetal apresenta.

Ao longo dos anos, uma série de artigos científicos têm explorado a *B. glabra* em vários contextos. Desde sua taxonomia e ecologia até suas potenciais aplicações medicinais e fitoquímicas. A descrição morfológica da *B. glabra* está apresentada no Quadro 7 e na Figura 5. Em seguida, são citados alguns estudos que contribuíram para a compreensão da planta.

Quadro 7 - Descrição morfológica da planta *Bougainvillea glabra*

Aspecto	Descrição
Folhas	Alternadas, simples, ovadas-acuminadas, com 4 a 13 cm de comprimento e 2 a 6 cm de largura. Disposição: Alternada Venação: Pinada Persistência: Sempre-verde Forma: Lanceolada Margens: Onduladas Textura: Suave Odor: sem fragrância
Flores	Pequenas e geralmente brancas, agrupadas em cachos de três flores, cercadas por 3 a 6 brácteas coloridas (rosa, magenta, roxo, vermelho, laranja, branco, amarelo). Exibição: Verdadeira Tamanho: 0 - 1.5 cm Tipo: Solitária Sexualidade: Monóica (bissexual) Fragrância: Ausente

Aspecto	Descrição
	Estações: Primavera e verão.
Árvore	Trepadeira lenhosa, perene, que cresce de 1 a 12 m. Tronco lenhoso geralmente torcido. Caule fino com espinhos afiados e folhas verde-escuras.

Fonte: Adaptado Soni et al. (2019).

A Figura 8 mostra o aspecto da espécie e seu porte em uma praça pública em (A). Bem como, detalhes da distribuição das folhas nos ramos e inflorescência em (B). Além disso, as inflorescências (flores) que se encontram nas posições axilares ou terminais, do tipo dicásio composto com perianto tubuloso envolvido por três brácteas de coloração violeta/rósea (C).

Figura 8: Fotografias da (A) planta (B) folhas (C) bráctea e flores da espécie *Bougainvillea glabra*



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

El-chaghaby et al. (2020) empregou folhas secas de *Bougainvillea glabra* como material biossorvente na remoção de chumbo em soluções aquosas. A partir de experimentos de adsorção sob várias condições experimentais (tempo de contato, massa do biossorvente, concentração inicial de íons e pH da solução). A remoção máxima de chumbo foi de 84,65% em 90mn com concentração inicial de 25 mg/L, destacando as folhas secas como biossorvente ecologicamente viável.

Cirillo et al. (2015), ao estudar o estresse hídrico na *Bougainvillea glabra* na Itália, analisaram as respostas agronômicas e fisiológicas de cinco genótipos da planta: *B. glabra* var. *sanderiana*, *B. glabra* var. *sanderiana* 'Variegata', *B. x buttiana* 'Raspberry Ice', *B. x buttiana* 'Rosenka' e *B. Lindleyana*. O estudo aplicou diferentes níveis de irrigação deficitária (DI) para avaliar a adaptação desses genótipos à limitação hídrica, buscando economizar água sem comprometer o valor ornamental.

Os resultados mostraram que o grau de estresse hídrico é um fator crítico, com tolerância manifestada por mecanismos como aumento da resistência estomática, redução do potencial hídrico e osmótico das folhas, especialmente em regimes com 25% da água disponível. Houve variações significativas entre os genótipos nas respostas morfológicas e fisiológicas, indicando a importância da escolha adequada para cada condição.

Concluímos que o estresse hídrico pode ser usado para obter *Bougainvillea* de vaso de alta qualidade plantas, mas o grau de estresse hídrico imposto é crítico para a resposta dessa espécie. A irrigação com 25% de água diminuiu a biomassa em quase 20% e aumentou o número de flores, enquanto a irrigação com 50% de água pode representar uma ferramenta eficaz, pois diminuiu o crescimento da planta em apenas 10% e aumentou significativamente a qualidade ornamental. A tolerância de *Bougainvillea* ao estresse hídrico parece ser influenciada por fatores genéticos, sugerindo que *B. glabra* var. *sanderiana* e *B. glabra* var. *sanderiana* 'Variegata' podem ser consideradas potenciais candidatas para fins ornamentais em condições de limitação hídrica. (Cirillo et al. 2015, p. 206-207).

Gupta et al. (2009) e Ahmed et al. (2014) realizaram análise fotoquímica preliminar das folhas em diferentes extratos metabólicos das folhas de *Bougainvillea glabra*. Os principais resultados dessas pesquisas mostraram a presença de alcalóides, glicosídeos (quantidade mínima), flavonoides, taninos, esteróides, proteínas e saponinas. Já Markandana et al. (2016) avaliaram propriedades antioxidantes das brácteas de *Bougainvillea glabra* em diferentes concentrações de metanol.

Dentre os principais resultados obtidos destaca-se que as brácteas possuem compostos fenólicos e flavonoides. Altas atividades antioxidantes foram observadas nos ensaios DPPH, ABTS e FRAP. Em estudo subseqüente, Markandana et al. (2018) avaliaram o potencial antioxidante do extrato etanólico das brácteas de *Bougainvillea glabra* (EEBGB), utilizando quatro métodos diferentes. O estudo

revelou alta atividade antioxidante, incluindo a eliminação de radicais livres e superóxidos, além de um bom desempenho nos ensaios de redução férrica (FRAP) e absorção de radicais de oxigênio (ORAC). Os resultados indicam que as brácteas dessa planta são uma fonte promissora de antioxidantes naturais, capazes de neutralizar radicais livres que podem danificar membranas celulares e DNA.

Salleem et al. (2019) analisaram extratos metanólicos e de diclorometano das flores de *Bougainvillea glabra*, investigando sua composição fitoquímica, propriedades antioxidantes, inibição enzimática e citotoxicidade. Os testes antioxidantes (DPPH, ABTS, FRAP e CUPRAC) destacaram elevados níveis de compostos bioativos e fenólicos, além de uma rica diversidade de antioxidantes. O estudo também evidenciou significativa inibição das enzimas colinesterases e  $\alpha$ -glucosidase. Esses achados indicam que *Bougainvillea glabra* possui elevado potencial antioxidante, inibidor enzimático e citotóxico, sugerindo sua utilidade na descoberta de novas moléculas bioativas.

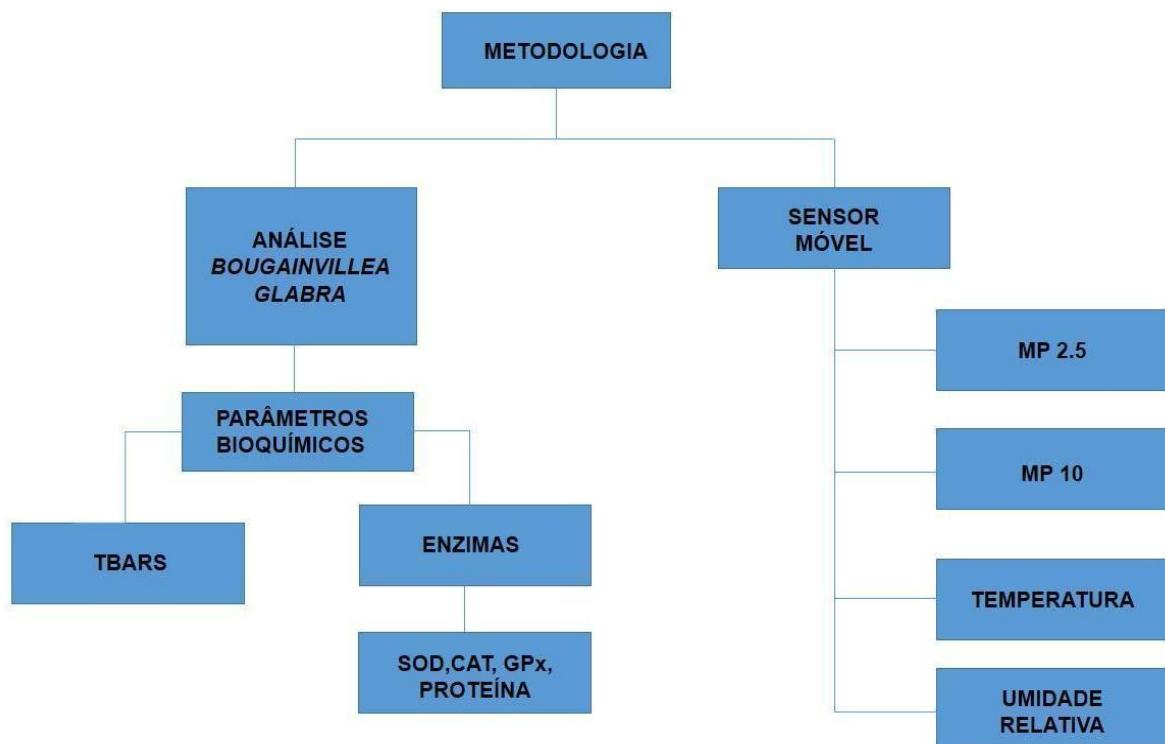
Os estudos mostram que a *Bougainvillea glabra* é uma planta multifuncional com diversas aplicações. Ela é eficaz na biorremediação ambiental, especialmente em solos contaminados, e na remoção de poluentes em meio aquoso, como metais pesados. Além disso, sua resistência ao estresse hídrico e suas propriedades fitoquímicas e antioxidantes destacam seu valor em áreas industriais, ambientais e de saúde. Essas características comprovam que, além de ornamental, a *B. glabra* apresenta um significativo potencial funcional, alinhado à sustentabilidade e à inovação tecnológica.

## 5. Materiais e métodos

As análises realizadas na planta *Bougainvillea glabra* e no ambiente que circunda a planta estão apresentados na Figura 9. Para determinação dos parâmetros bioquímicos da planta *Bougainvillea glabra* foi realizada coleta, lavagem com água deionizada, seca e armazenamento de suas folhas, brácteas e flores. Na sequência, foi preparado o extrato enzimático das folhas, brácteas e flores da planta. O extrato obtido foi utilizado para as análises de atividade enzimática (SOD, CAT e GPx) e estresse oxidativo (TBARS).

Para a determinação dos parâmetros ambientais foi verificada a qualidade do ar nos pontos de coleta. O material particulado (MP 1, MP 2,5 e MP 10), a temperatura (T), e a umidade relativa do ar (%UR) foram mensuradas através do uso de sensor móvel *AirBeam2* pelo período de exposição de 15 min.

Figura 9: Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

## 5.1 Área de estudo

A área de estudo engloba os municípios de Pelotas e Capão do Leão. Os pontos de coleta desta pesquisa estão situados majoritariamente no município de Pelotas (Latitude: -31.776, Longitude: -52.3594 31° 46' 34" Sul, 52° 21' 34" Oeste), situado a cerca de 257 Km da capital Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. O município possui área territorial de 1.609,708 Km<sup>2</sup>, densidade demográfica de 203,89 hab/Km<sup>2</sup> (IBGE, 2020) e pode ser acessado por quatro rodovias (BR 116, BR 293, BR 392 e RS 471). Os pontos de coleta encontram-se na área urbana do município de Pelotas (Pontos 2 a 10). Os locais de coleta foram estabelecidos pela presença da espécie *Bougainvillea glabra* em ruas e avenidas com intenso tráfego de automóveis na área urbana do município.

Um ponto de coleta está localizado no município de Capão do Leão (Latitude: -31.7675, Longitude: -52.4487; latitude 31°45'48" Sul; Longitude 52°29'02" Oeste), situado a cerca de 226 Km da capital Porto alegre, no Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. O município possui área territorial de 785,373 Km<sup>2</sup>, densidade demográfica de 30,94 hab./Km<sup>2</sup> (IBGE, 2020) sendo cruzado pela linha férrea (que liga Rio Grande/RS a Cacequi/RS) e por duas rodovias (BR 116 e BR 293). Esse ponto de coleta encontra-se em área distante do perímetro urbano (Ponto 1, denominado como áreas verdes). Com isso a interferência com relação ao trânsito de automóveis pode ser considerada mínima.

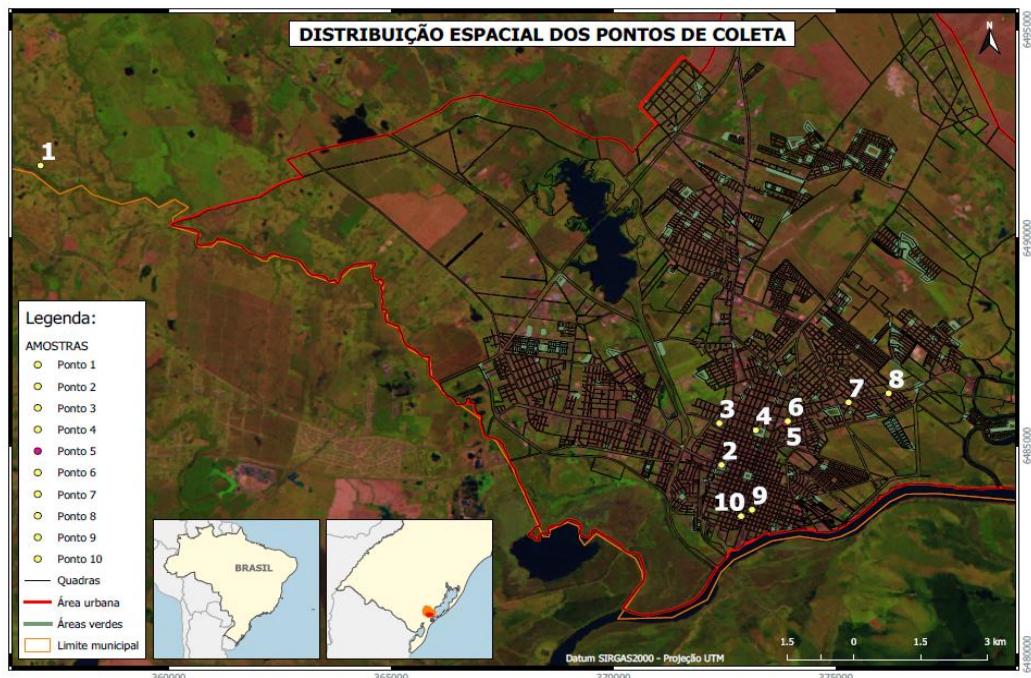
As coordenadas geográficas foram determinadas através do sistema geodésico oficial do Brasil DATUM SIRGAS2000, Projeção UTM (Universal Transversa of Mercator) Fuso 22 Sul. As coordenadas geográficas dos pontos de coleta estão apresentadas no Quadro 8. A distribuição espacial dos pontos de coleta pode ser observada na Figura 7. As plantas selecionadas para a coleta de dados podem ser observadas em fotografias apresentadas na Figura 8 (ponto 1) e na Figura 9 (pontos 2 a 10).

Quadro 8: Coordenadas geográficas dos pontos de coleta\* DATUM SIRGAS2000 - Projeção UTM - Fuso 22 Sul

Pontos	Leste*	Oeste*	Descrição
1	357114,407	6491735,807	Capão do Leão
2	372431,318	6484538,973	Praça Cipriano Barcelos
3	372382,916	6485541,074	Av. Bento Gonçalves
4	373204,169	6485374,928	Parque Dom Antônio Zattera
5	373878,516	6485553,717	Av. Domingos José de Almeida, 353
6	373922,033	6485589,395	Av. Juscelino Kubitscheck de Oliveira
7	375288,471	6486044,277	Av. Domingos José de Almeida, 1829
8	376187,789	6486261,463	Av. Domingos José de Almeida, 2774
9	373116,400	6483464,021	Rua Almirante Barroso, 1059
10	372871,613	6483307,671	Rua Benjamin Constant, 1692

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 10: Mapa da Distribuição espacial dos pontos de coleta



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 11 - Fotografias: (A) espécie *Bougainvillea glabra* no ponto de coleta 1, (B) porte da espécie e (C) detalhe da espécie em floração (C).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 12: Fotografias da espécie *Bougainvillea glabra* nos pontos de coleta. Fotos acima, dos Pontos 2 ao 6 e abaixo dos Pontos 7 ao 10.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

## 5.2 Procedimento de coleta e armazenamento

A amostragem consistiu na coleta de folhas, brácteas e flores de espécies de *Bougainvillea glabra* pré-existentes e identificadas nos locais selecionados, conforme demonstra a Figura 10 supramencionada. Dez pontos de coleta foram amostrados, contendo um indivíduo da espécie por local de coleta. O ponto 1 foi denominado como controle, e está localizado no município de Capão do Leão. Os demais pontos (2 a 10) estão localizados no município de Pelotas.

A visitação aos pontos de coleta foi realizada em intervalos de tempo entre 20 a 30 dias. As coletas ocorreram nos meses de novembro de 2022 a março de 2023, para possível coleta da floração da espécie. A condição climatológica para a realização das coletas foi de prevalência de dias com predomínio de sol, nos quais as temperaturas variaram entre 20 e 30 °C.

O processo de coleta das amostras (folhas, brácteas e flores) aconteceu em períodos da manhã e da tarde. As amostras foram criteriosamente selecionadas, buscando a coleta de folhas sem nenhum tipo de sujeira proveniente de dejetos de pássaros ou outras substâncias (não enrugadas, queimadas, cortadas, etc.) (Azzazy, 2020). As amostras foram retiradas dos galhos das plantas e acondicionadas em sacos plásticos. As mesmas foram identificadas e levadas ao Laboratório de Análise de Águas e Efluentes, localizado no Centro de Engenharias (CEng) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

As amostras coletadas foram lavadas com água deionizada. As mesmas permaneceram sobre a bancada para que ocorresse a evaporação natural da água da superfície (Figura 10). Na sequência, as folhas, brácteas e flores que apresentavam aspecto visual saudável foram selecionadas manualmente. Para a escolha foi observada a uniformidade de superfície e estrutura das mesmas. Assim como, a coloração e tonalidade das folhas (cor verde), das brácteas (cores violetas /róseas) e das flores (cor amarela).

Esses critérios de seleção estão de acordo com as metodologias aplicadas para análises bioquímicas, pois as mesmas utilizam as folhas frescas. Por fim, o pecíolo foi retirado manualmente e descartado, o tecido foliar foi triturado com o uso de almofariz e pistilo para o preparo dos extratos foliares (Maioli et al., 2008).

Figura 13 - Amostras de folhas e brácteas secas de *Bougainvillea glabra*.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 5.3 Análises bioquímicas da *Bouganvillea glabra*

As amostras da *Bouganvillea glabra* foram submetidas a análises bioquímicas a fim de determinar a atividade enzimática e estresse oxidativo. Com isso verificar a suscetibilidade da planta como bioindicadora. As análises bioquímicas foram realizadas nas folhas, brácteas e flores das plantas de cada um dos pontos de coleta (pontos 1 a 10). Primeiramente foi obtido o extrato enzimático, e em seguida este foi analisado quanto a atividade das enzimas: superoxidase dismutase (SOD), catalase (CAT), atividade da enzima glutationa peroxidase (GPx). Também foi realizada a determinação das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) e determinação de proteína. Todos os ensaios foram conduzidos em triplicata.

#### 5.3.1 Obtenção do extrato enzimático

A preparação do extrato enzimático das partes da planta *Bougainvillea glabra* (folha, flor e brácteas) foi realizada através da metodologia descrita por Yasin et al. (2018) com adaptações. Na qual, 500 mg das amostras frescas (folhas, brácteas ou

flores) da planta foram adicionadas a 3 mL de solução tampão Tris-HCl (Sigma, pH 7,5). A mistura foi macerada com o auxílio de um almofariz e um pistilo de porcelana. A biomassa resultante foi transferida para tubos (Eppendorf) e centrifugada (CENTRÍFUGA NT 800, NOVATÉCNICA) a 5000 rpm por 20 minutos. Após a separação foi realizado o armazenamento do sobrenadante (extrato) em refrigeração para a realização das análises bioquímicas.

### **5.3.2 Determinação da atividade da enzima superóxido dismutase**

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi determinada pelo procedimento descrito por Giannopoliities e Ries (1977). Na qual é realizada a adição de 50 µL de extrato enzimático da planta em 3 mL de mistura de reação contendo 63 µM de azul de nitrotetrazólio (êxodo científica), 1,3 µM de riboflavina (Dinâmica), 13 mM de metionina (Dinâmica), 0,1 mM de EDTA e 50 mM tampão Tris HCl (Sigma, pH 8).

O preparo da solução foi realizado em ambiente sem iluminação em frascos de vidro cobertos com papel alumínio. Em seguida os frascos foram expostos à luz fluorescente por 20 min. Após a absorbância da solução foi lida no espectrofotômetro SPECTROPHOTOMETER MODEL NOVA 1600UV, NOVA INSTRUMENTS), utilizando cubeta de quartzo e comprimento de onda de 560 nm.

### **5.3.3 Determinação da atividade da enzima catalase**

A atividade da enzima catalase (CAT) baseou-se no procedimento descrito por Aebi (1984). Na qual se adiciona 300 µL do extrato enzimático a mistura de reação contendo 2,5 mL de tampão fosfato 50 mM (pH = 7,0) e 200 µL de peróxido de hidrogênio 1% (Rioquímica,) em temperatura ambiente de  $25 \pm 1$  °C. A absorbância da solução resultante foi lida a cada 15 segundos até completar 2 minutos.

As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (SPECTROPHOTOMETER MODEL NOVA 1600UV, NOVA INSTRUMENTS), utilizando cubeta de quartzo e comprimento de onda de 240 nm. Os resultados foram expressos em unidades de atividade de catalase por mg de proteína

(unidades são definidas como a quantidade de enzima que quebra 1 µmol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por miligrama de proteína por min).

### **5.3.4 Determinação da atividade da enzima glutationa peroxidase**

A atividade da enzima glutationa peroxidase (GPx) foi estabelecida de acordo com o proposto por Upadhyaya et al. (1985). A metodologia se fundamenta na mistura de 20 µL de extrato enzimático com 1,0 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 1% (v/v) (Rioquímica), 2,5 mL de tampão fosfato 50 mM (pH = 6,1), e 1,0 mL de guaiacol a 1% (Dinâmica) (p/v). A absorbância da solução resultante foi lida a cada 30 segundos (1 min no total). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro, utilizando cubeta de quartzo e comprimento de onda de 420 nm. A taxa de oxidação do guaiacol foi expressa em unidade de GPx por mg de proteína.

### **5.3.5 Determinação das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico**

A determinação das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) foi realizada através de adaptação da metodologia descrita por Velikova, Yordanov e Edreva (2000). Na qual, 500 mg de amostra das partes da planta *Bouganvillea glabra* (folha, flor e brácteas) foram homogeneizadas em 5,0 mL de ácido acético 0,1 % (p/v) (êxodo científica) e centrifugadas a 10.000 g por 20 min. Após a separação do sobrenadante, a quantidade de 0,5 mL do extrato enzimático (sobrenadante) foi adicionada de 1,0 mL de ácido acético 20% (pH 3,5) e 1,0 mL de ácido tiobarbitúrico 0,5% (Merck, pH 4).

A solução resultante foi mantida em banho termostatizado (FISATOM) na temperatura de 95 ± 1 °C pelo tempo de 30 minutos. Posteriormente a solução foi transferida para banho de gelo na temperatura de 4°C por 10 minutos para cessar a reação. A solução foi centrifugada (CENTRÍFUGA NT 800, NOVATÉCNICA) a 3000 rpm por 5 min. Após a separação, foi realizada a leitura da absorbância da solução do sobrenadante. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (SPECTROPHOTOMETER MODEL NOVA 1600 UV, NOVA INSTRUMENTS), utilizando cubeta de quartzo e comprimento de onda de 532 nm. A concentração de TBARS foi determinada a partir de uma curva padrão e os dados expressos em nmol de MDA por mL.

### 5.3.6 Determinação de proteína

A determinação de proteína nas amostras da planta *Bougainvillea glabra* foi realizada de acordo com procedimento descrito por Lowry et al. (1951) com adaptações. O reagente de Lowry foi obtido pelo preparo das soluções de CTC e SDS. O preparo de 10 mL da solução CTC foi realizado através da adição de solução de sulfato de cobre ( $\text{CUSO}_4$  1,0%, êxodo científica), de solução de tartarato de sódio e potássio ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  2,0%, êxodo científica), ao qual foi adicionada a solução de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  2,0%, êxodo científica). O preparo de 10 mL da solução SDS (10%) foi realizado através da adição de 8,0 mL de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) (êxodo científica), 12,0 mL de água Milli-Q, reagente fenol Folin-Ciocalteau 2M (êxodo científica) [diluído na proporção 1:5 (v/v) em água Milli-Q] e albumina (Sigma Aldrich) (1 mg  $\text{mL}^{-1}$ ).

As amostras analisadas da planta *Bougainvillea glabra* foram preparadas em tubos de ensaio a partir da adição de 30  $\mu\text{L}$  do extrato enzimático, 1170  $\mu\text{L}$  de água Milli-Q e 1200  $\mu\text{L}$  do reagente de Lowry. As análises foram realizadas em triplicata para todas as partes da planta em estudo. Na sequência, a solução resultante foi agitada e permaneceu em repouso por 10 min. Após esse período foi adicionado 600  $\mu\text{L}$  do reagente de Folin (êxodo científica) e a solução passa por uma nova agitação. A solução é mantida por mais 30 minutos em repouso. Ao final, a leitura da absorbância foi lida em espectrofotômetro no comprimento de onda de 750 nm.

### 5.4 Análises da qualidade do ar nos pontos de coleta

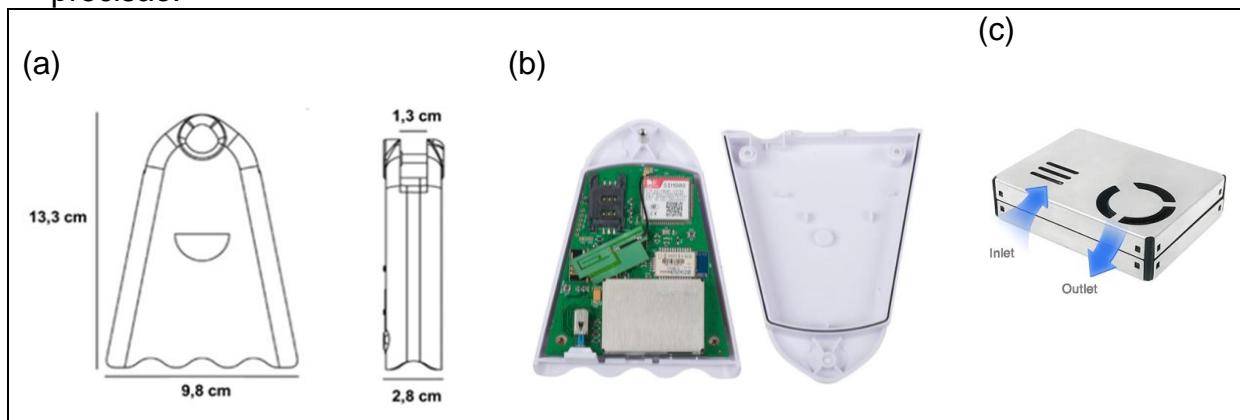
O sensor *AirBeam2* foi empregado nesta pesquisa com a finalidade de contribuir no diagnóstico da qualidade do ar, e nas concentrações de material particulado aos quais a planta *Bougainvillea glabra* está exposta. Neste sentido, a qualidade do ar nos locais (Figura 10) onde as plantas *Bougainvillea glabra* estão localizadas foi monitorada.

O sensor *AirBeam2* é versátil e de baixo custo, com ele foi possível obter dados de concentração de material particulado (MP 1, MP 2,5 e MP 10) através de laser de alta precisão (sensor Plantower PMS7003). Também foram obtidos dados de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa do ar (%UR). Algumas características do sensor *AirBeam2*: pode ser utilizado em modo de operação fixo ou móvel; os meios

de comunicação são através do WiFi e celular; a alimentação pode ser bateria ou fonte de energia externa. Além disso, possui plataforma on-line para a visualização dos dados coletados em tempo real.

A Figura 14 apresenta (a) o desenho esquemático com as dimensões do sensor *AirBeam2*, (b) a vista interna do sensor, e (c) o sensor digital de alta precisão (*Plantower PMS7003*) responsável pelas medições da concentração de partículas em suspensão no ar.

Figura 14 - Sensor *AirBeam2* (a) dimensões (b) vista interna (c) sistema de alta precisão.



Fonte: Adaptado de Albuquerque et al. (2021).

As medições com o sensor *AirBeam2* foram realizadas em todos os pontos de coleta relacionados neste estudo. A permanência do sensor em cada ponto de coleta foi de 15 minutos. O sensor foi utilizado no modo móvel, o mesmo foi conectado via bluetooth a um smartphone Android. Após o pareamento entre os aparelhos foi possível obter a localização e a transmissão dos dados de poluição em tempo real através da plataforma *AirCasting*. De acordo com Albuquerque et al. (2021) o sensor capta e coleta os dados a cada segundo tornando possível a geração de mapas de poluição do ar por material particulado.

Na Figura 14 (a) está exemplificada a forma como o sensor *AirBeam2* permaneceu junto a planta *Bougainvillea glabra* no ponto de coleta 04. Enquanto na Figura 14 (b) podemos visualizar os dados fornecidos pelo aplicativo *AirCasting* referentes ao ponto de coleta nº1.

Além da coleta simultânea de dados de concentração de material particulado MP<sub>1</sub>, MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub> são obtidas informações de temperatura e umidade relativa do ar. A concentração de material particulado foi expressa em µg de poluente por m<sup>3</sup>.

Figura 15 - (a) sensor *AirBeam2* alocado junto a planta *Bougainvillea glabra* (b) dados de monitoramento em tempo real no aplicativo AirCasting.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A correlação de Pearson foi empregada para avaliar a relação linear entre as concentrações de material particulado ( $\text{MP}_1$ ,  $\text{MP}_{2,5}$ ,  $\text{MP}_{10}$ ) e Radiação com os níveis do marcador de peroxidação lipídica (TBARS) nas amostras. Essa análise permitiu verificar a existência e a intensidade de prováveis associações entre as variáveis ambientais e bioquímicas, indicando possíveis efeitos do material particulado sobre o estresse oxidativo nas plantas. O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) foi calculado utilizando-se o software Excel, considerando nível de significância de  $p < 0,05$ . Os valores de  $r$  foram interpretados conforme Dancey et al.(2013), sendo classificados como, sendo classificados como fracos ( $0,10$ – $0,39$ ), moderados ( $0,40$ – $0,69$ ) ou fortes ( $\geq 0,70$ )

## 5.5 Análise de Dados

Os diferentes órgãos vegetais coletados e analisados, foram analisados mensalmente e comparados entre si. Os dados foram testados quanto à normalidade e após análise de variância, ANOVA, e quando significativos, foram submetidos ao teste de Tukey com probabilidade de erro de 95 % ( $P<0,05$ ). As diferenças estatísticas e agrupamentos foram identificados por letras maiúsculas em cada média. A barra de erro é o intervalo de confiança calculado pelo software. O software utilizado para a análise estatística e elaboração dos gráficos foi o Statistix 9.0.

Em seguida foram analisadas as correlações de Pearson e regressões lineares entre a presença e tamanho de material particulado e radiação presente nos pontos de coleta com a variável demarcadora de estresse nas plantas utilizada neste trabalho, TBARS (peroxidação de lipídeos), nos diferentes órgãos vegetais estudados, folha, flores e brácteas. Essa correlação de Pearson, é calculada linearmente de acordo com os valores obtidos entre as duas variáveis analisadas, sendo  $R^2$  mais próximo a 1 indicativo de uma forte correlação linear e quanto mais próximo a 0, mais fraca.

## 6. Resultados e Discussão

Os resultados e discussão desta pesquisa foram estruturados em três tópicos. Primeiramente serão apresentadas as alterações na morfologia floral e foliar de indivíduos da espécie *Bougainvillea glabra* expostos aos poluentes em pontos localizados na cidade de Pelotas - RS. Após, são apresentados os resultados das análises de estresse oxidativo e atividade enzimática da folha, flor e brácteas. Por fim são apresentados os dados de monitoramento passivo de material particulado (MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>) nos pontos de coleta deste estudo.

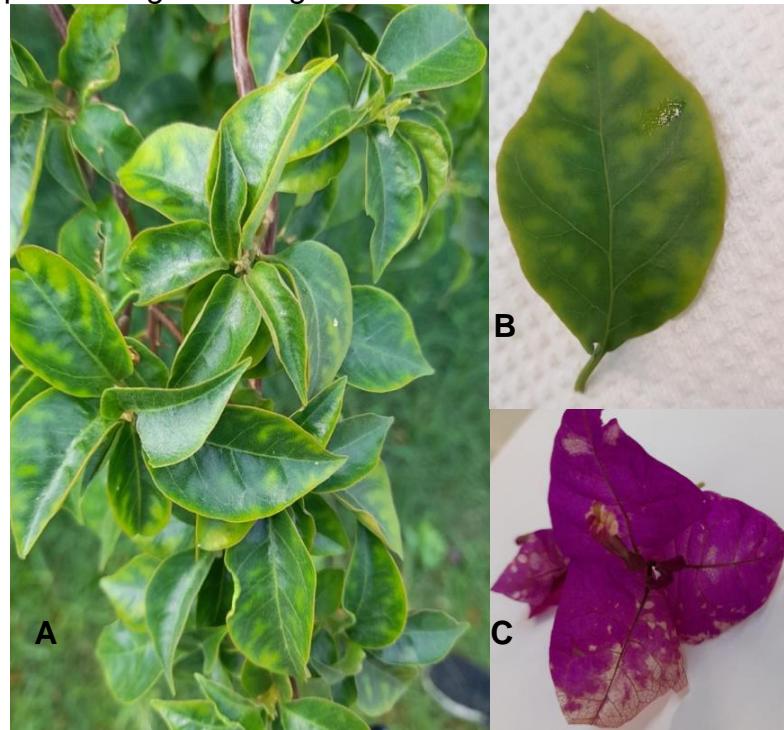
### 6.1 Alterações da morfologia floral e foliar

As possíveis alterações na morfologia da planta *Bougainvillea glabra* foram observadas a olho nu e fotografadas nos locais de coleta e no laboratório. Pode-se observar a ocorrência de alterações fisiológicas, destacando-se: necrose e/ou clorose (Figura 16). Além dessas, também observou-se a possível presença de fungos fitopatogênicos (Figura 17) e de lagartas (Figura 17e), principalmente nos pontos de coleta localizados no perímetro urbano (pontos 2 a 10).

Segundo a United States Environmental Protection Agency (1992), a necrose é a morte de células, tecidos vegetais ou animais, com sintoma visual de descoloração de caules e de folhas. A mesma agência conceitua a clorose como “a descoloração de partes da planta normalmente verdes causadas por doenças, falta de nutrientes ou vários poluentes do ar” (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1992, p.6). A Figura 13 apresenta sintomas visuais de clorose na espécie *Bougainvillea glabra* de causa aparentemente abiótica.

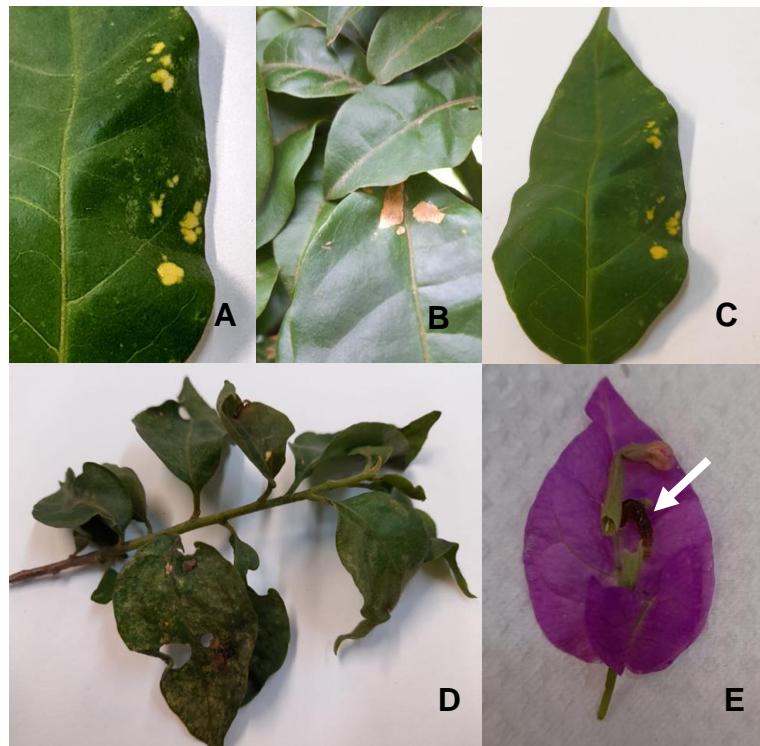
Em relação aos sintomas derivados de causas bióticas há uma gama de patógenos para plantas, incluindo: vírus, bactérias, fungos, oomicetos e nematóides (Sallam et al., 2019). Os fungos são agentes responsáveis por doenças foliares, podendo causar sintomas como manchas circulares, descoloração, formação de pústulas, necrose e deformidades. A Figura 17 apresenta sintomas visuais de presença de fungos e de lagarta, bem como possíveis perfurações causadas pela mesma na espécie *Bougainvillea glabra*.

Figura 16 - Sintomas visuais de (a, b) clorose internerval em folhas, e (c) clorose em brácteas na espécie *Bougainvillea glabra*.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 17 - Sintomas visuais da presença de (a,b,c) fungo, (d) fungo e perfuração causada por lagartas, (e) presença de lagarta na estrutura floral da espécie *Bougainvillea glabra*.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

## 6.2 Aptidão da *Bougainvillea glabra* como bioindicadora

A aptidão da *Bougainvillea glabra* como bioindicadora foi avaliada ao longo dos meses novembro e dezembro de 2022, e meses de janeiro, fevereiro e março de 2023. A concentração de malondialdeído (MDA) e as atividades das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e glutationa peroxidase (GPx) estão apresentadas nas Figuras 18 a 29, respectivamente. Os resultados estão expressos como atividade enzimática presente nas (a) folhas (b) flores e (c) brácteas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período avaliado.

Na Figura 18 são apresentados os dados das concentrações de MDA em folhas das plantas de *Bougainvillea glabra*, nos diferentes meses e nos diferentes locais de coleta. O nível de peroxidação lipídica, estimado pela acumulação de malondialdeído (MDA), apresentou variação espacial significativa entre os pontos de amostragem, de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

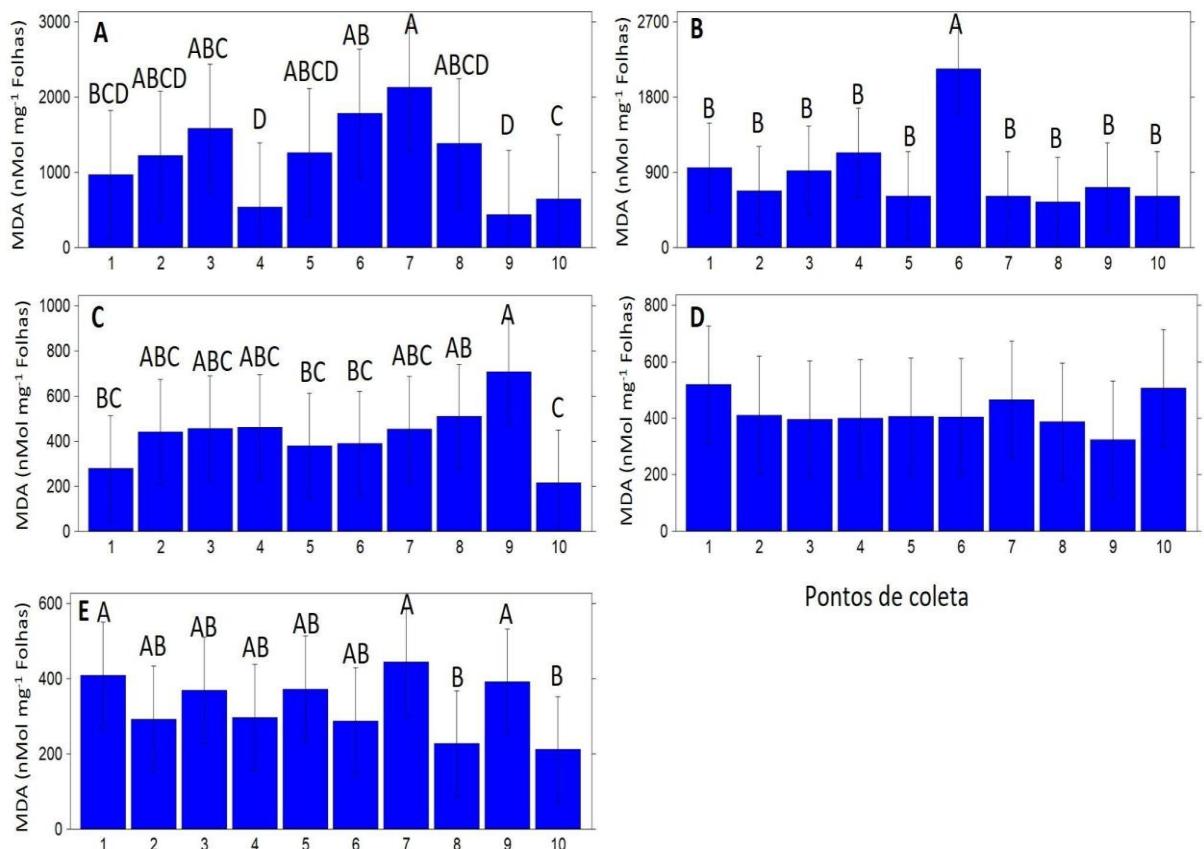
Em novembro (Figura 18A), o teor de MDA atingiu seu pico no ponto 7, diferindo estatisticamente dos pontos 4, 9 e 10, indicando uma explosão oxidativa seguida de declínio da peroxidação lipídica nos pontos finais de coleta. Valores intermediários (pontos 1–3, 5–6 e 8) formaram grupos sobrepostos, sugerindo menor estresse oxidativo nesses locais.

Em dezembro (Figura 18B), a concentração de MDA alcançou o máximo no ponto 6, apresentando aumento acentuado e isolado em relação aos demais, que permaneceram estatisticamente semelhantes (grupo “B”). Esse padrão denota um pico oxidativo de curta duração, possivelmente desencadeado por um estresse agudo nesse ponto de amostragem.

Em janeiro (Figura 18C), as flutuações no MDA foram moderadas, com valores significativamente mais altos no ponto 9 em comparação ao 10, enquanto os pontos intermediários exibiram agrupamentos sobrepostos. A modesta amplitude de variação sugere controle mais eficaz do metabolismo oxidativo nesse mês. Em fevereiro (Figura 18D), não foram observadas diferenças significativas entre os pontos, conforme indicado pelas mesmas letras (“A”), demonstrando estabilidade dos níveis de MDA e ausência de perturbações oxidativas relevantes. Entretanto, em março (Figura 18E), os níveis de MDA foram mais altos nos pontos 1, 7 e 9, diferindo estatisticamente dos pontos 8 e 10. A elevação da peroxidação lipídica no início e

meio da sequência de pontos pode refletir sinal oxidativo mais intenso seguido de atenuação parcial do dano nos diferentes locais amostrados.

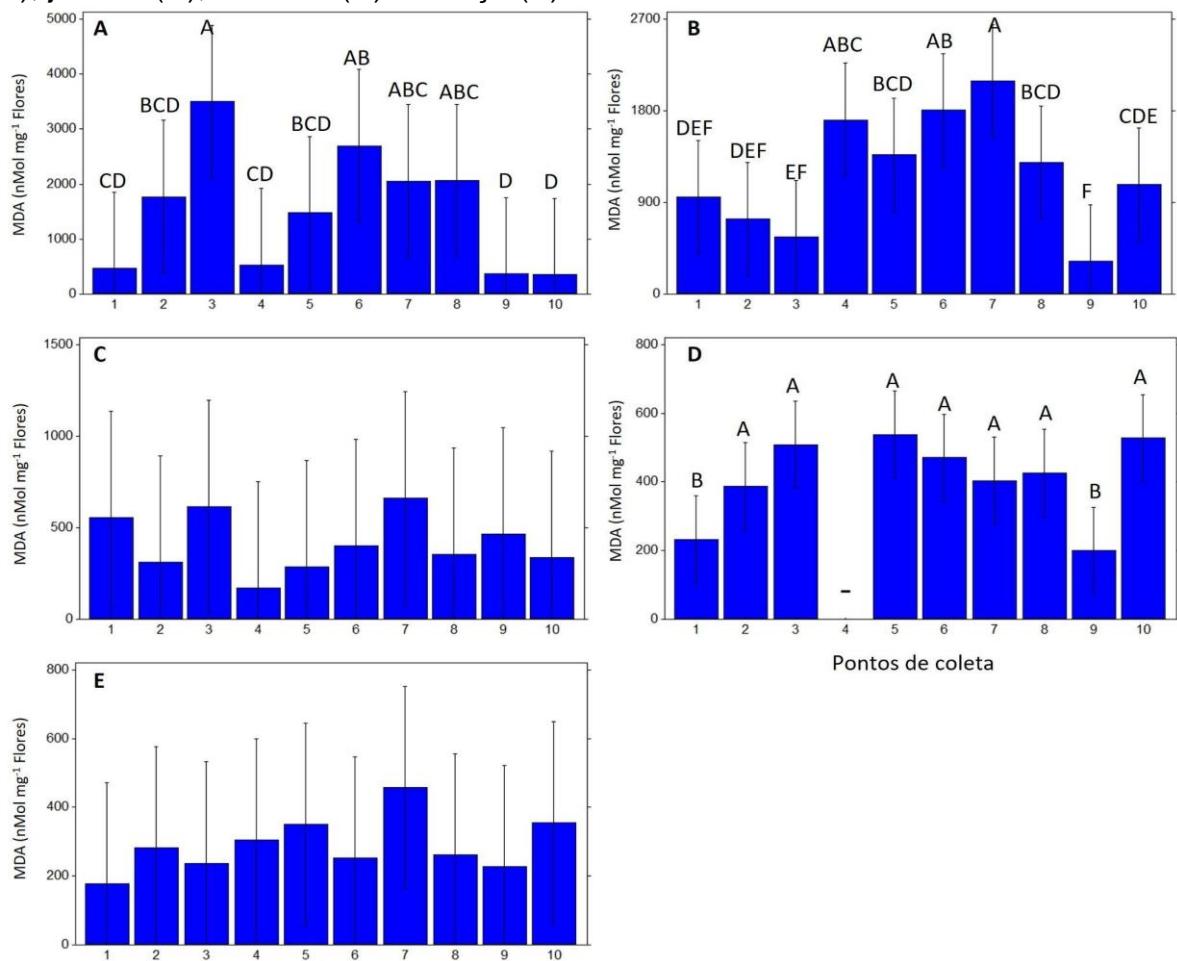
Figura 18 - Concentração de malondialdeído (MDA) presente nas folhas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Figura 19 - Concentração de malondialdeído (MDA) presente nas flores da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Os resultados de MDA nas flores, Figura 19, apresentados no decorrer dos meses, mostram que em novembro (Figura 19A), observou-se heterogeneidade espacial acentuada. A maior concentração de MDA ocorreu no ponto 3, diferindo estatisticamente dos pontos 4, 9 e 10. Valores intermediários foram detectados nos pontos 5–7 (grupos AB–ABC), enquanto os menores níveis acumularam-se nas extremidades (pontos 9–10). Esse padrão indica um gradiente localizado de

estresse oxidativo, provavelmente influenciado por diferenças microambientais, como exposição solar, variação térmica ou umidade do solo. Em dezembro (Figura 19B), padrão semelhante persistiu, com o valor máximo de MDA no ponto 7, significativamente superior aos demais. Os pontos 1–6 e 8 exibiram valores intermediários, enquanto o ponto 10 apresentou o menor nível oxidativo. Esses dados sugerem persistência de “pontos quentes” de estresse oxidativo, possivelmente ligados a instabilidades microclimáticas ou influências ambientais antrópicas.

Durante janeiro (Figura 19C), as concentrações de MDA diminuíram acentuadamente, e não foram detectadas diferenças significativas entre os pontos. A sobreposição das barras de erro e agrupamentos homogêneos indicam redução geral da pressão oxidativa e maior uniformidade fisiológica das plantas. Em fevereiro (Figura 19D), reapareceu leve variação espacial, com o ponto 2 apresentando menor teor de MDA (grupo B) em relação aos demais (grupo A).

Essa diferenciação modesta sugere desequilíbrio oxidativo localizado, porém limitado. Finalmente, em março (Figura 19E), os valores de MDA mantiveram-se baixos e estatisticamente semelhantes em todos os pontos, indicando restauração da homeostase redox e perfil oxidativo consistente entre os locais.

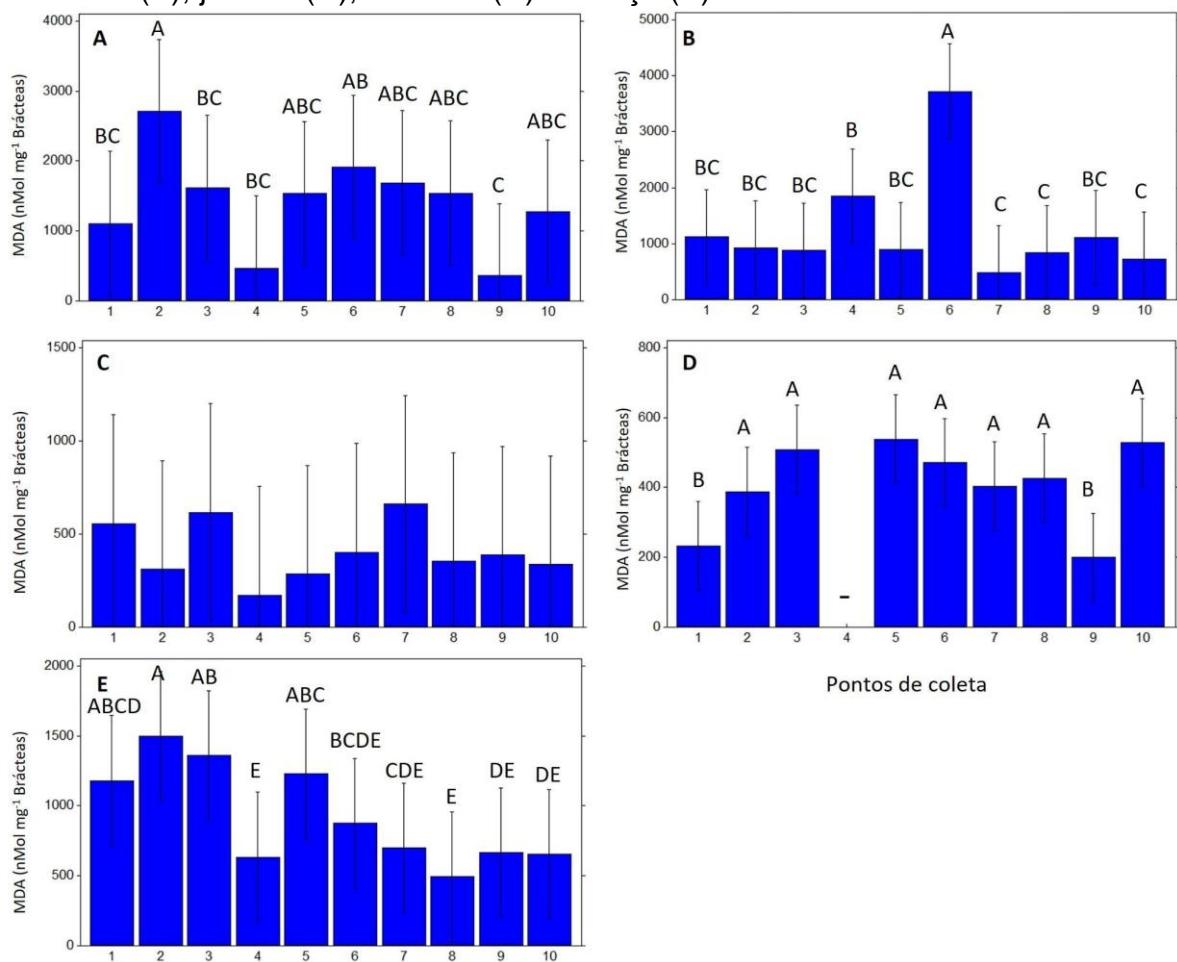
A concentração de MDA nas brácteas é demonstrada na Figura 20. Os níveis de MDA nas brácteas apresentaram variação espacial e temporal significativa ao longo dos cinco meses de amostragem, conforme o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Em novembro (Figura 20A), as concentrações de MDA mostraram heterogeneidade marcante. O maior valor foi registrado no ponto 2, diferindo estatisticamente dos pontos 3, 4 e 9. Valores intermediários ocorreram entre os pontos 5–8, enquanto o menor conteúdo foi observado no ponto 9 (grupo C).

Esse padrão indica “pontos quentes” de oxidação, possivelmente associados à variação de exposição à luz ou poluentes. Em dezembro (Figura 20B), o perfil oxidativo tornou-se mais distinto, com acúmulo máximo de MDA no ponto 6, significativamente superior aos demais. Os locais 1–5 e 7–10 formaram grupos mais homogêneos (BC–C), sugerindo concentração espacial da atividade oxidativa em um único ponto — provavelmente reflexo de estresse ambiental transitório (radiação intensa, calor ou déficit hídrico).

Em janeiro (Figura 20C), os níveis de MDA diminuíram e não houve diferenças significativas entre pontos, conforme agrupamentos sobrepostos de

Tukey, indicando redução da intensidade de estresse oxidativo e condição fisiológica mais uniforme. Contudo, em fevereiro (Figura 20D), as brácteas voltaram a apresentar variação discreta, com menores teores de MDA nos pontos 2 e 9 (grupo B). A estabilidade geral dos demais pontos indica manutenção da homeostase oxidativa. Finalmente, em março (Figura 20E), observou-se nova heterogeneidade: o ponto 2 manteve o maior conteúdo de MDA, diferindo estatisticamente dos pontos 6–10 (grupo BCDE). O padrão indica declínio espacial do estresse oxidativo nos pontos finais, coerente com recuperação sazonal ou aumento da proteção antioxidante.

Figura 20 - Concentração de malondialdeído (MDA) presente nas brácteas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

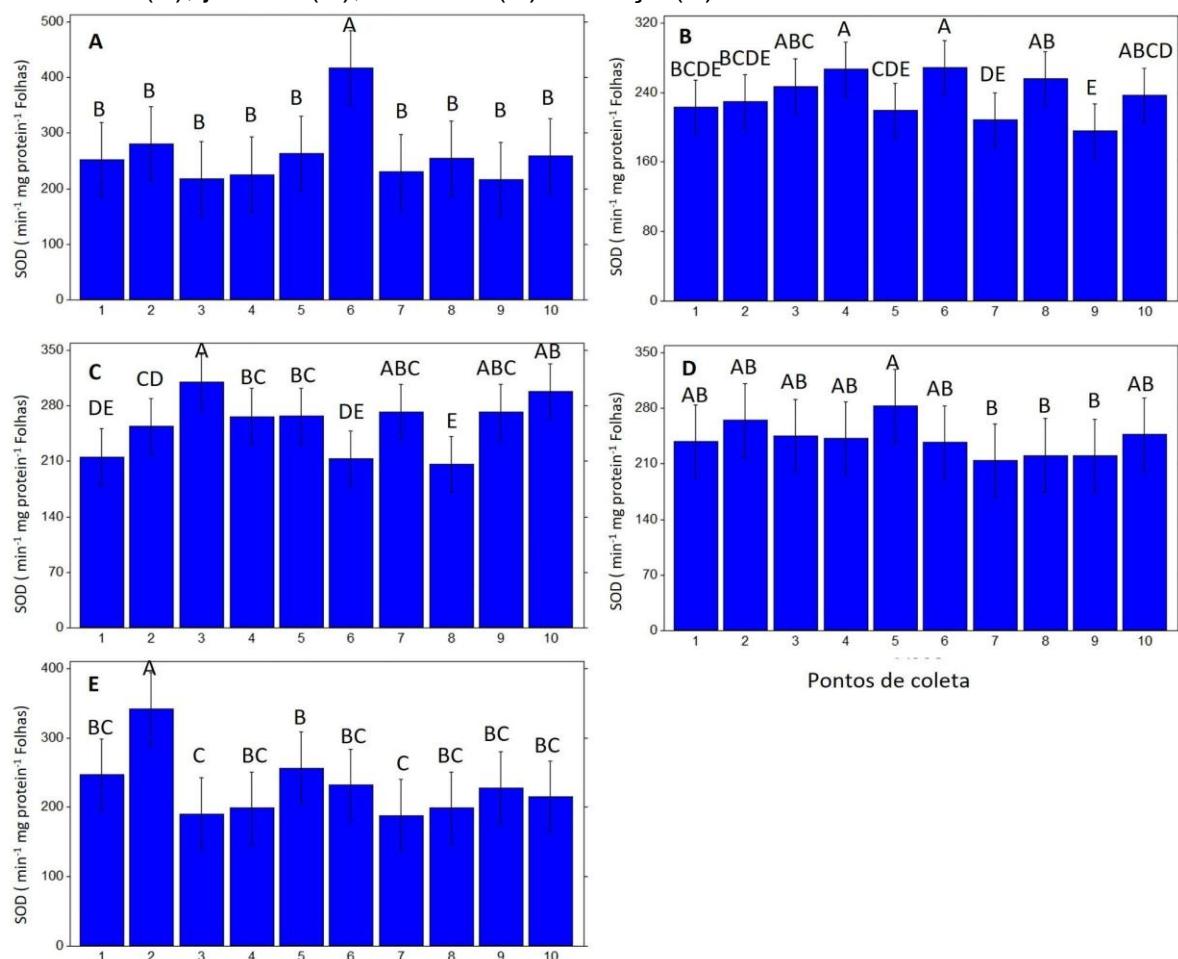
Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas

letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 (n=3).

A atividade de SOD nas folhas apresentou flutuações espaciais e temporais marcadas ao longo dos meses, segundo o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Em novembro (Figura 21A), verificou-se aumento acentuado da atividade no ponto 5, significativamente superior aos demais (grupo A vs. B). Essa elevação localizada sugere desafio oxidativo transitório, com ativação seletiva da defesa enzimática. Os demais pontos mostraram atividade homogênea, indicando níveis basais semelhantes de destoxificação de ROS. Em dezembro (Figura 21B), a SOD manteve variação moderada, com maior atividade nos pontos 5 e 7 (grupo A) e menor no 8 (grupo E). A distribuição relativamente uniforme dos grupos intermediários (B–D) reflete estabilização adaptativa do controle redox enzimático.

Em janeiro (Figura 21C), a atividade enzimática declinou levemente, mas permaneceu diferenciada espacialmente: o ponto 3 exibiu o maior valor (grupo A), superando os pontos 7 e 8 (grupo E). Essa distribuição indica eventos oxidativos locais compensados por indução de SOD. Em fevereiro (Figura 21D), observou-se atividade moderada e consistente, com aumento significativo no ponto 5 em relação aos pontos 7 e 8 (grupos A vs. B). Essa uniformidade relativa demonstra manutenção eficaz da capacidade antioxidante. Em março (Figura 21E), a atividade total foi menor, com pico no ponto 2 (grupo A), diferindo dos de baixa atividade (grupo BC). A redução na atividade e na heterogeneidade espacial sugere menor demanda oxidativa e provável regulação negativa sob condições sazonais mais brandas.

Figura 21 - Atividade enzima superóxido dismutase (SOD) presente nas folhas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

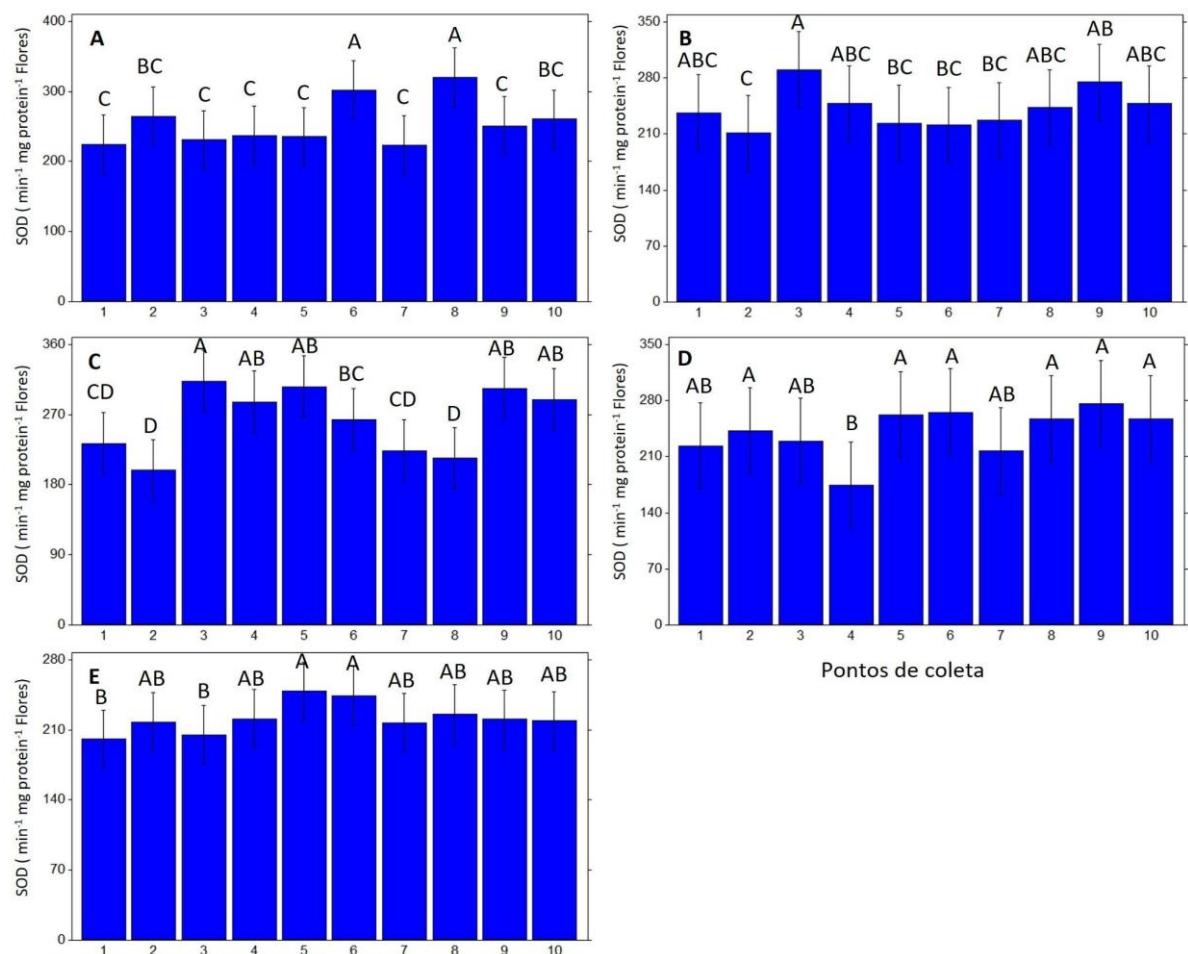
Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

A atividade de SOD nas flores apresentou variação moderada, mas consistente entre os pontos e meses, com diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ). Em novembro (Figura 22A), a maior atividade foi registrada nos pontos 5 e 7, ambos superiores aos pontos 1-4 e 6 (grupo C). Valores intermediários foram observados em 8 e 10, indicando aumento localizado da SOD em resposta a pressões oxidativas

específicas. Em dezembro (Figura 22B), a atividade manteve-se uniforme, com valor máximo no ponto 4 (grupo A) e mínimo no 2 (grupo C).

A predominância de grupos sobrepostos (A–C) sugere homogeneização parcial da resposta antioxidante. Em janeiro (Figura 22C), a SOD atingiu pico no ponto 3 (grupo A), superando 1, 2, 7 e 9 (grupos C–D), sugerindo estímulo oxidativo transitório. Em fevereiro (Figura 22D), o padrão foi estável, com a maioria dos pontos agrupados (A–AB), exceto o 4 (grupo B). Em março (Figura 22E), não houve diferenças significativas entre os pontos (grupos A–B), indicando baixa pressão oxidativa e homeostase eficiente

Figura 22 - Atividade enzima superóxido dismutase (SOD) presente nas flores da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

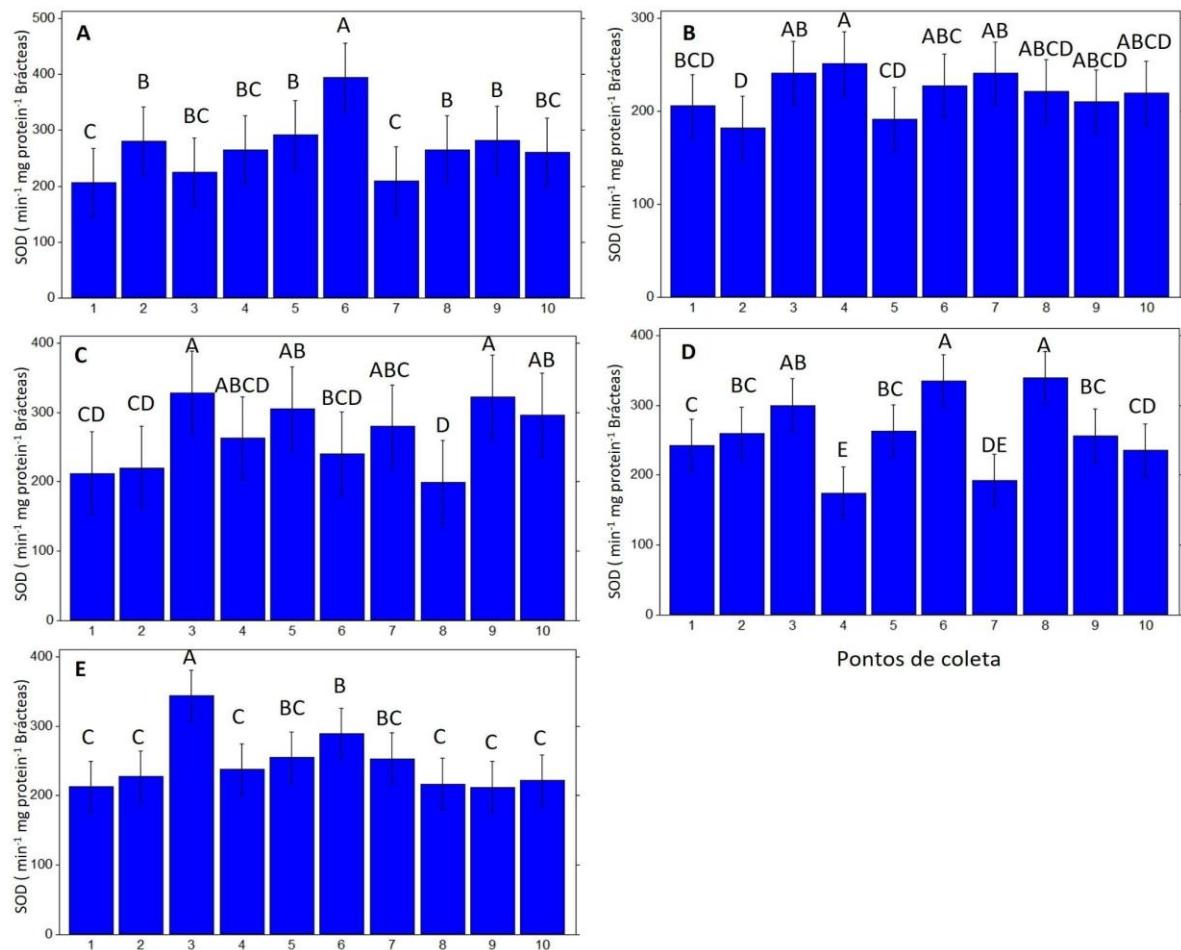
Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As

diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 (n=3).

A SOD nas brácteas mostrou variação significativa entre meses e pontos ( $p \leq 0,05$ ). Em novembro (Figura 23A), o ponto 6 apresentou a maior atividade (grupo A), superando os pontos 1, 4 e 7 (grupos B–C). Essa heterogeneidade revela estresse oxidativo localizado estimulando a ativação enzimática. Em dezembro (Figura 23B), a atividade permaneceu alta, porém com menor variação; o ponto 5 atingiu o máximo (grupo A) e o 2 o mínimo (grupo D).

A maioria dos pontos agrupou-se em B–C, refletindo ativação antioxidante moderada e difusa. Em janeiro (Figura 23C), a maior atividade ocorreu nos pontos 3 e 9 (grupo A), superiores a 1, 2 e 8 (grupos C–D). Em fevereiro (Figura 23D), a resposta intensificou-se nos pontos 6 e 7 (grupo A), enquanto o ponto 4 exibiu o menor valor (grupo E). Em março (Figura 23E), a atividade de SOD diminuiu, embora o ponto 3 mantivesse o pico (grupo A). A menor variabilidade indica atenuação do estresse oxidativo e retorno a níveis fisiológicos basais.

Figura 23 - Atividade enzima superóxido dismutase (SOD) presente nas brácteas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



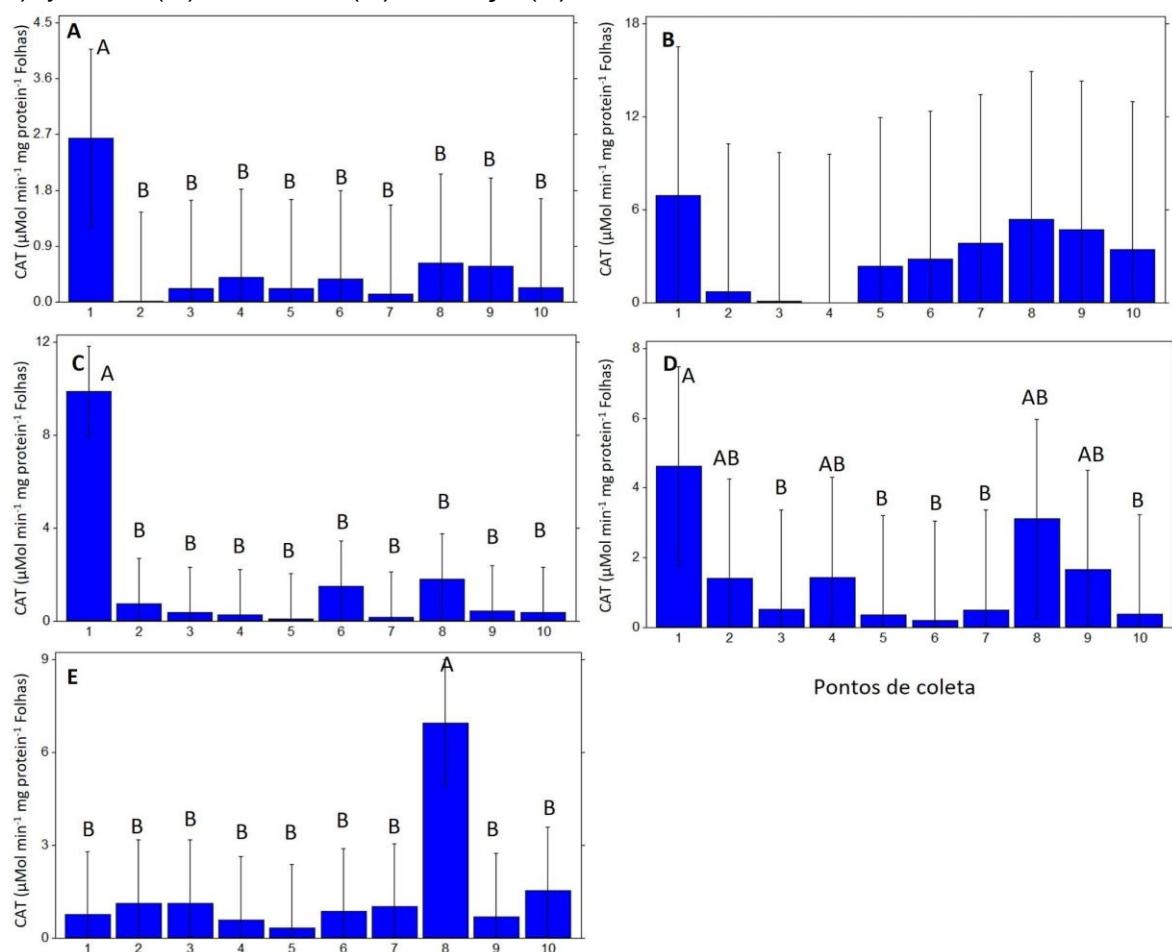
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Quanto à atividade da CAT nos diferentes órgãos, essa enzima antioxidante tem capacidade de detoxificar peróxido de hidrogênio de forma constitutiva, ajustando sua atividade de acordo com o equilíbrio redox celular e tecidual. Nas folhas (Figura 24), em novembro (Figura 24A), a CAT apresentou pico no ponto 1, significativamente maior que os demais (grupo A vs. B), com declínio acentuado nos pontos seguintes. Esse padrão reflete evento oxidativo localizado exigindo maior

destoxificação de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Em dezembro (Figura 24B), a CAT manteve-se baixa, sem diferenças significativas; elevação leve foi observada nos pontos 8–10. Em janeiro (Figura 24C), o padrão se repetiu, com pico novamente no ponto 1 (grupo A), sugerindo foco recorrente de estresse. Em fevereiro (Figura 24D), houve aumento moderado em vários pontos, com valores mais altos em 1 e 8 (grupos A–AB). Em março (Figura 24E), observou-se pico deslocado para o ponto 8 (grupo A), indicando migração espacial da ativação enzimática conforme alterações ambientais.

Figura 24 - Atividade enzima catalase (CAT) presente nas folhas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro (D) a março (E).



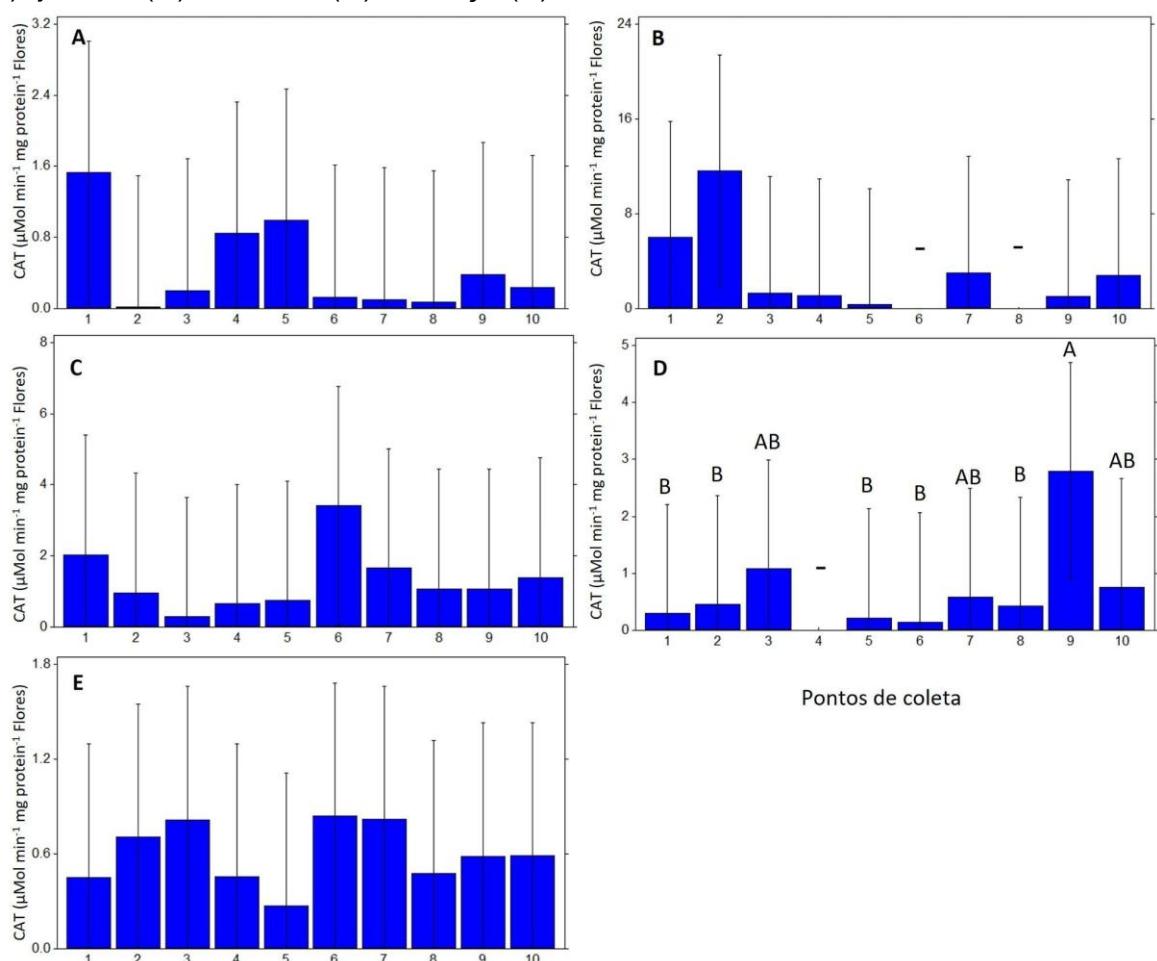
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas

letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 (n=3).

Nas flores (Figura 25A–E), a CAT apresentou comportamento análogo: picos localizados em meses iniciais e uniformização posterior. O ponto 2 destacou-se com atividade máxima em novembro e janeiro, diferindo dos demais. Em fevereiro, os pontos 1 e 7 apresentaram maior atividade, e em março, a enzima estabilizou-se em baixos níveis, sem diferenças espaciais significativas. Isso demonstra retorno às condições basais e redução da pressão redox.

Figura 25 - Atividade enzima catalase (CAT) presente nas flores da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



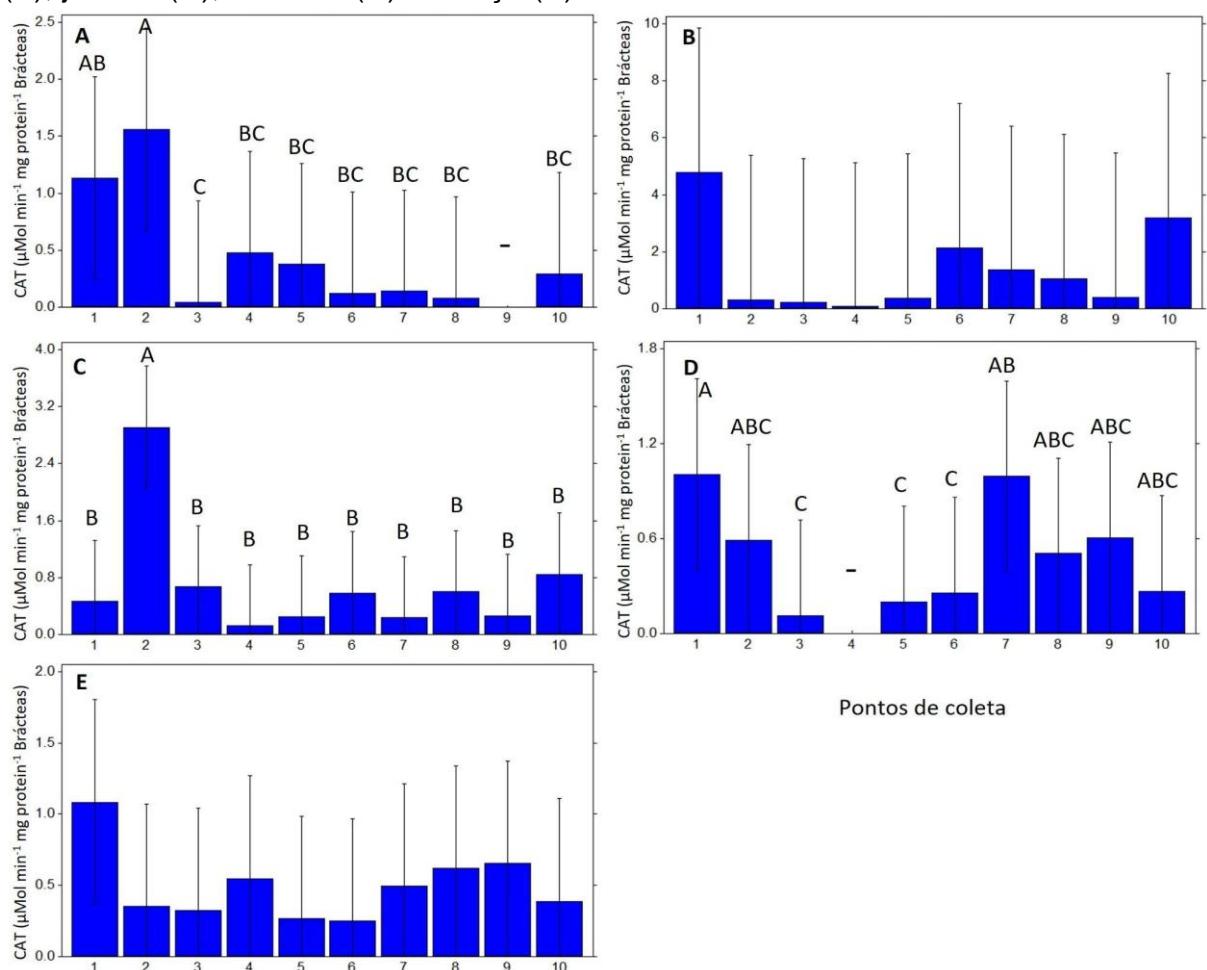
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As

diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 (n=3).

Nas brácteas, a CAT também variou significativamente ( $p \leq 0,05$ ). Em novembro (Figura 26A), a maior atividade ocorreu no ponto 2 (grupo A); em dezembro, a atividade manteve-se baixa e uniforme, com leve aumento em 6 e 7. Em janeiro (Figura 26C), o padrão de ativação no ponto 2 reapareceu, indicando recorrência espacial de estresse. Em fevereiro (Figura 26D), a atividade foi mais distribuída, com picos em 1 e 7 (grupos A-AB). Em março, a CAT estabilizou-se em níveis baixos, denotando condições oxidativas reduzidas.

Figura 26 - Atividade enzima catalase (CAT) presente nas brácteas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).

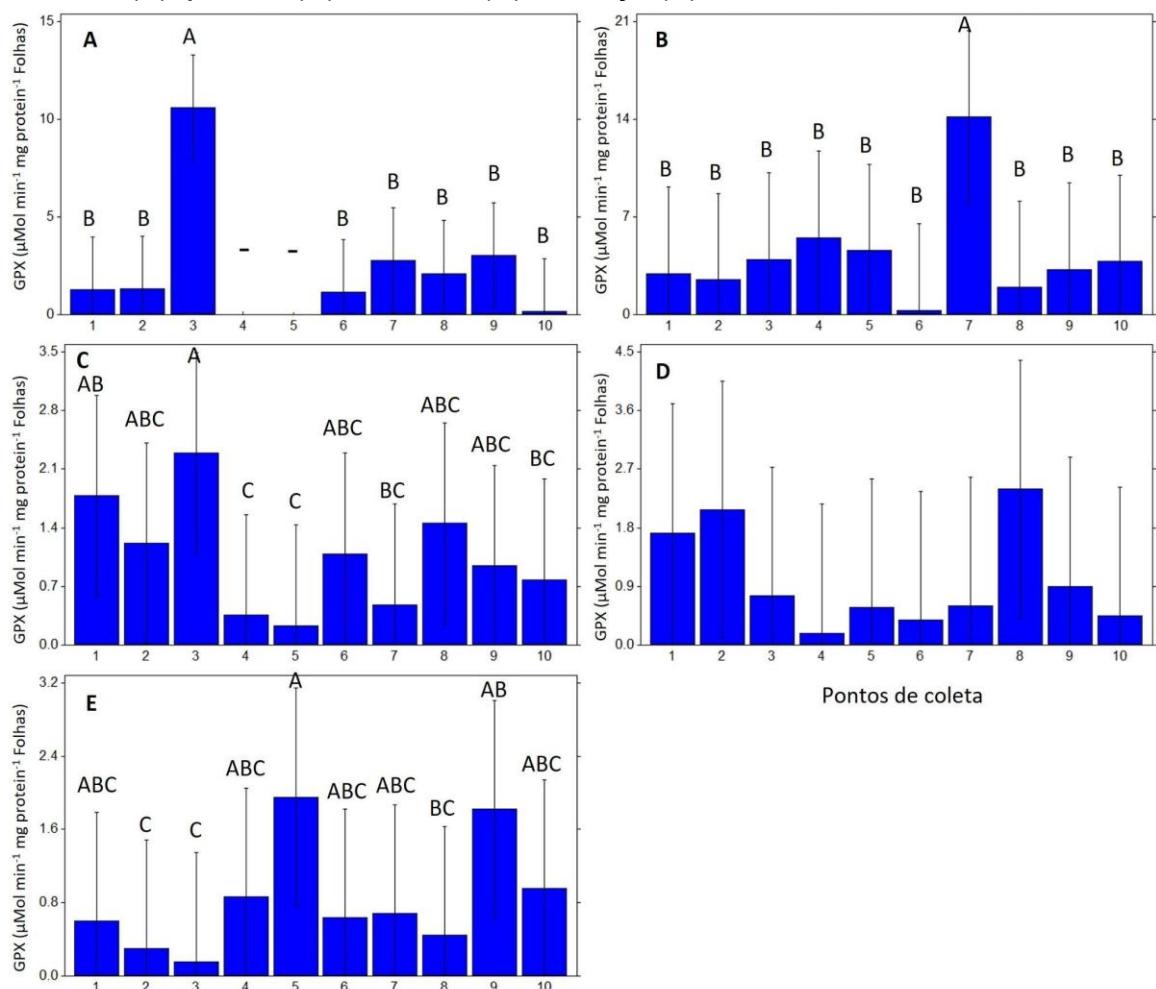


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Para a atividade da enzima antioxidante GPX, outra peroxidase, enzima capaz de detoxificar a espécie reativa de oxigênio peróxido de hidrogênio. Nas folhas (Figura 27) foram detectados aumentos na atividade de GPX. Em novembro (Figura 27A), a atividade máxima ocorreu no ponto 3 (grupo A); em dezembro (Figura 27B), o pico deslocou-se para o ponto 7. Em janeiro (Figura 27C), os valores gerais diminuíram, mas mantiveram heterogeneidade espacial, com o ponto 3 novamente superior. Em fevereiro (Figura 27D), a atividade tornou-se homogênea, e em março (Figura 27E) houve leve aumento no ponto 4 (grupo A), indicando ativação moderada do sistema glutationa-dependente ao final do período.

Figura 27 - Atividade enzima glutationa peroxidase (GPx) presente nas folhas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



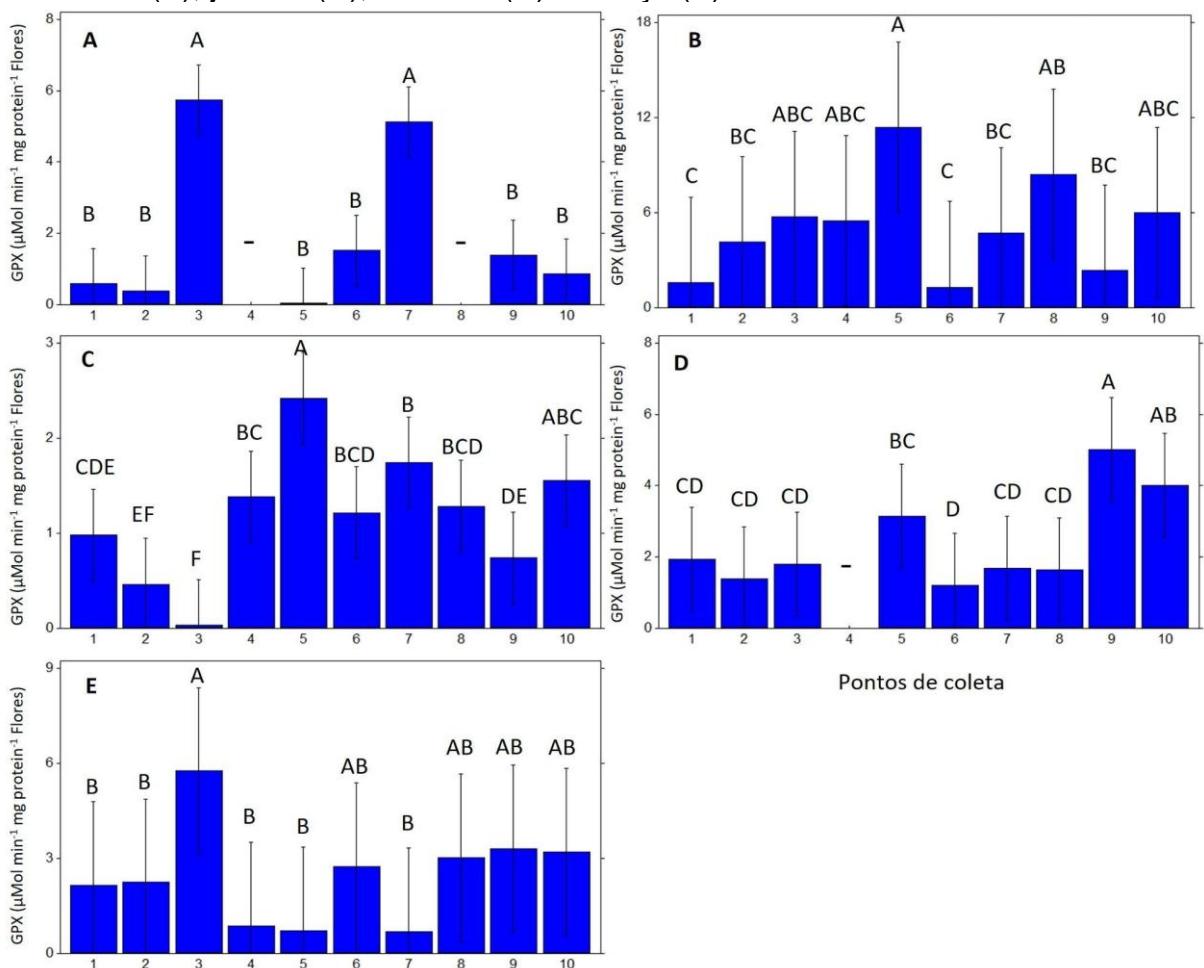
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Nas flores (Figura 28A-E), a GPX variou significativamente entre pontos e meses. Em novembro, picos duplos ocorreram nos pontos 3 e 7; em dezembro, o máximo foi no 5; em janeiro, o 5 novamente exibiu maior atividade, diferindo dos pontos 1-3 e 8. Em fevereiro, a enzima reduziu sua amplitude, mas manteve pico localizado no 9; e em março, apresentou perfil homogêneo, com leve predominância

no ponto 4. Esses resultados indicam estímulos oxidativos localizados e estabilização antioxidante nos meses finais.

Figura 28 - Atividade enzima glutationa peroxidase (GPx) presente nas flores da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



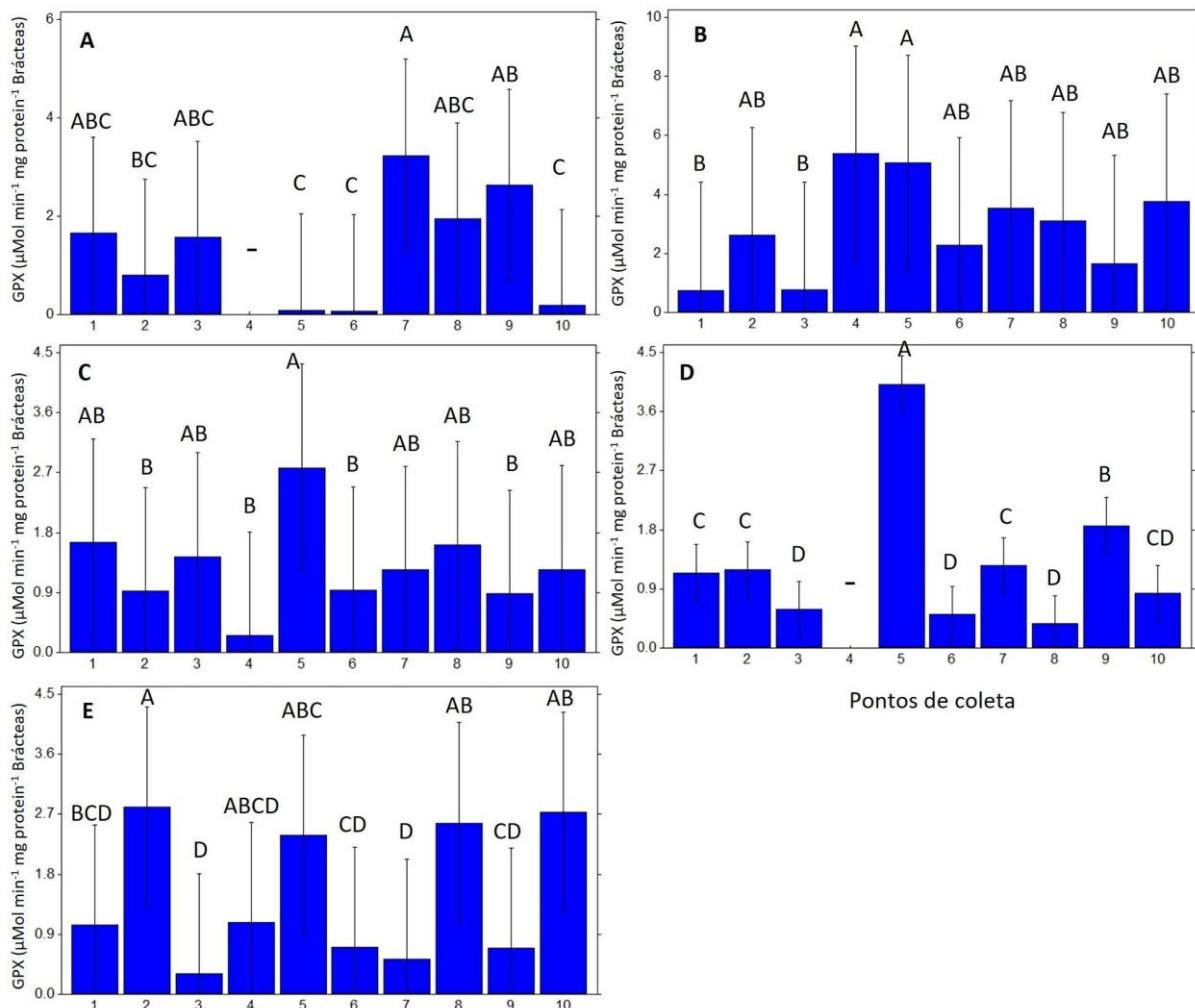
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Por fim, nas brácteas (Figura 29A-E), a GPx mostrou picos distintos em cada mês: no 7 em novembro; nos 4 e 5 em dezembro; no 5 em janeiro e fevereiro; e no 2

em março. A recorrência de ativação nos mesmos pontos indica pressão oxidativa persistente em microambientes específicos, enquanto o declínio geral nos meses finais sugere restauração da homeostase redox.

Figura 29 - Atividade enzima glutationa peroxidase (GPx) presente nas brácteas da espécie *Bougainvillea glabra* dos pontos de coleta no período de novembro (A), dezembro (B), janeiro (C), fevereiro(D) a março (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Dados referentes aos diferentes órgãos vegetais, coletados mensalmente, em diferentes pontos amostrais foram comparados pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As diferenças e agrupamentos segundo o teste estatístico são demonstrados pelas letras maiúsculas. As barras de erro representam o intervalo de confiança calculado pelo software estatístico. A análise estatística e a construção dos gráficos foram realizadas utilizando o Statistix 9.0 ( $n=3$ ).

Esses achados destacam que a avaliação conjunta das diferentes partes da planta fornece uma visão mais abrangente do estresse oxidativo, reforçando a importância de monitorar períodos de maior vulnerabilidade, como os meses de novembro e dezembro. Além disso, os dados obtidos podem contribuir para a identificação de áreas expostas a fatores ambientais estressantes, como poluição atmosférica ou variações climáticas, consolidando a *Bougainvillea glabra* como uma ferramenta eficaz no monitoramento ambiental.

### 6.3 Qualidade do ar nos pontos de coleta

A qualidade do ar nos pontos de coleta foi monitorada com o sensor *AirBeam2*. As concentrações de material particulado aos quais as plantas *Bougainvillea glabra* estiveram submetidas estão apresentadas nas Tabelas 1 a 5. O sensor também forneceu a temperatura e umidade relativa.

Para efeito de comparação também serão apresentados dados do INMET para temperatura, umidade relativa e radiação para o dia e horário da coleta realizada pelo sensor. Os dados de temperatura e umidade relativa são disponibilizados de hora em hora pelo INMET. Os valores apresentados nas Tabelas 1 a 5 representam a média da variável (T e UR) e seu desvio médio para o horário da medição com o sensor.

A saber, na Tabela 1 a medição no sensor para o Ponto 1 foi realizada das 08:25 até às 08:44. A partir da temperatura fornecida pelo INMET foi feita a média entre as temperaturas das 8:00 e das 9:00. Nesse sentido, tem-se que a temperatura média entre 8 e 9 horas foi  $21,4 \pm 0,2$  °C. O mesmo procedimento foi realizado para os valores de umidade relativa. Com relação aos dados de radiação, estes estão apresentados na forma de Gráficos com os valores de radiação nas 24 horas do dia da coleta.

A Tabela 1 apresenta os dados da qualidade do ar nos pontos de coleta para novembro/2022. Em que podemos observar que as concentrações de  $MP_{2,5}$  variaram de 7 a 17  $\mu g/m^3$ , enquanto as de  $MP_{10}$  oscilaram entre 10 e 27  $\mu g/m^3$ . O ponto 3 apresentou os maiores níveis de  $MP_{2,5}$  (17  $\mu g/m^3$ ) e  $MP_{10}$  (27  $\mu g/m^3$ ), sugerindo maior poluição atmosférica nesse local. Os Pontos 2, 9 e 10 registraram os menores valores de  $MP_{2,5}$  (7  $\mu g/m^3$ ) e  $MP_{10}$  (10  $\mu g/m^3$ ), indicando um ambiente

menos contaminado que o Ponto 1, que registrou valores de  $MP_{2,5}$  (10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e  $MP_{10}$  (15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Tabela 1 - Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para novembro/2022

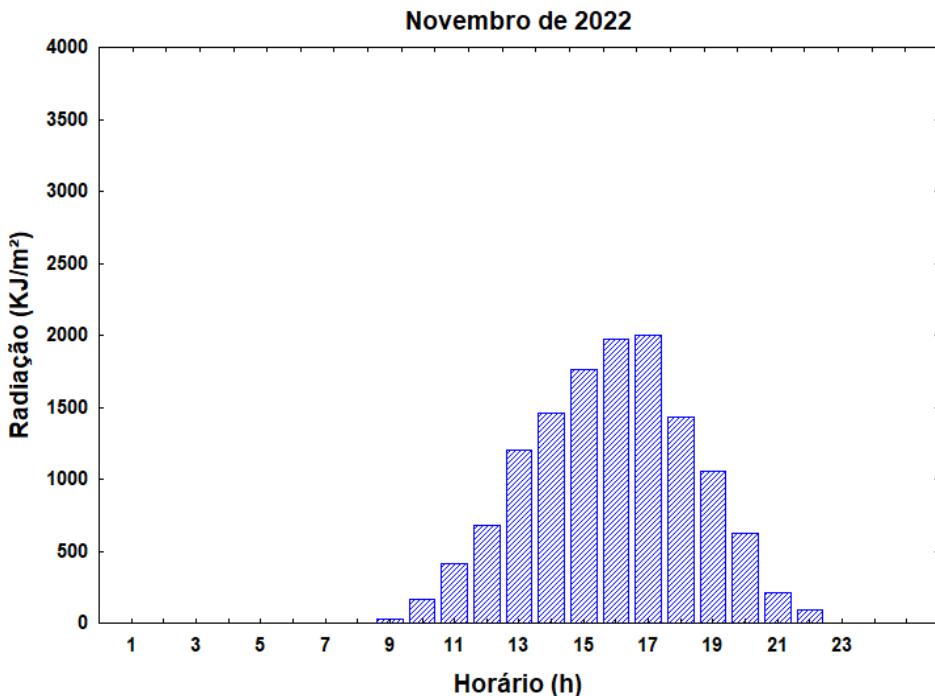
Ponto	Dados sensor				*Dados INMET		
	**T (°C)	**UR (%)	**MP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Horário	*T (°C)	*UR (%)	
	MP <sub>2,5</sub> MP <sub>10</sub>						
1	20	92	10	15	08:25 - 08:44	21,4 ± 0,2	91,0 ± 1,0
2	33	71	7	10	15:15 - 15:30	26,0 ± 0,2	69,5 ± 1,5
3	29	84	17	27	09:54 - 10:14	21,8 ± 0,1	89,0 ± 1,0
4	29	84	13	20	10:31 - 10:47	22,2 ± 0,3	86,5 ± 1,5
5	31	79	12	18	11:27 - 11:42	22,9 ± 0,4	83,0 ± 2,0
6	34	84	15	23	11:01 - 11:19	22,9 ± 0,4	83,0 ± 2,0
7	34	66	8	12	14:29 - 14:50	25,5 ± 0,4	68
8	31	78	8	12	13:47 - 14:02	24,5 ± 0,6	76,5 ± 2,5
9	32	76	7	10	13:12 - 13:28	24,5 ± 0,6	76,5 ± 2,5
10	30	79	7	10	12:48 - 13:00	23,6 ± 0,4	80,0 ± 1,0

\*valor médio ± desvio \*\* T -Temperatura; UR-Umidade relativa; MP-Material Particulado.

Fonte: INMET, 2022.

Com relação à temperatura registrada pelos sensores, esta variou de 20°C (Ponto 1) a 34°C (Pontos 6 e 7), enquanto a umidade relativa oscilou entre 66% (Ponto 7) e 92% (Ponto 1). Comparando com os dados do INMET, os valores médios de temperatura e umidade relativa foram ligeiramente inferiores, mas compatíveis com os registros dos sensores. Os horários de medição variaram entre a manhã e a metade da tarde, com concentrações mais elevadas de material particulado em horários intermediários (pontos 3 e 6).

Figura 30 - Dados INMET de Radiação para o dia 21 novembro 2022



Fonte: Instituto nacional de Meteorologia Estação – INMET, Capão do Leão Pelotas A887

A Figura 30 apresenta os dados de radiação, em que podemos observar que a radiação solar aumentou gradualmente pela manhã, atingindo um pico de cerca de 2000 kJ/m<sup>2</sup> às 17h. Nos horários de coleta (Tabela 1), observou-se maior temperatura e menor umidade relativa na metade da tarde (por volta das 15h), coincidindo com níveis mais altos de radiação. As condições meteorológicas de temperatura, umidade relativa e radiação podem influenciar na movimentação do ar e por consequência na dispersão do material particulado.

A Tabela 2 apresenta os dados da qualidade do ar nos pontos de coleta para dezembro/2022. As concentrações de MP<sub>2,5</sub> determinadas para o mês de dezembro variaram entre 1 e 3 µg/m<sup>3</sup> para os pontos de coleta, exceto o Ponto 2 que atingiu o valor de 7 µg/m<sup>3</sup>. Para MP<sub>10</sub> os valores oscilaram entre 1 e 5 µg/m<sup>3</sup>, com o Ponto 2 também apresentando o maior valor (8 µg/m<sup>3</sup>). Mesmo assim, pode-se inferir que os dados indicam baixos níveis de material particulado. Já a temperatura registrada pelo sensor variou de 19°C (Ponto 1) a 32,7°C (Ponto 3).

As medições do INMET foram consistentes, com médias variando de 19,06°C a 27,7°C, refletindo as condições mais amenas de dezembro. Com relação aos valores de umidade relativa, os mesmos variaram entre 65% (Ponto 6) e 90% (Ponto

1), com dados do INMET corroborando essa tendência. As medições ocorreram em horários variados ao longo do dia. Valores mais altos de MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> foram observados no início da manhã (Ponto 2), enquanto os menores valores ocorreram no período da tarde e noite.

Com relação aos dados de radiação para dezembro (Figura 31) pode-se verificar que ocorreram picos de radiação entre 14h e 17h, com valores acima de 3000 kJ/m<sup>2</sup>. A radiação foi mais intensa em relação a novembro. Cabe ressaltar que as medições indicaram estabilidade nos níveis de MP, mesmo durante os horários de maior radiação (Tabela 2), em que a temperatura mais alta (30,5°C) foi registrada no horário de maior radiação.

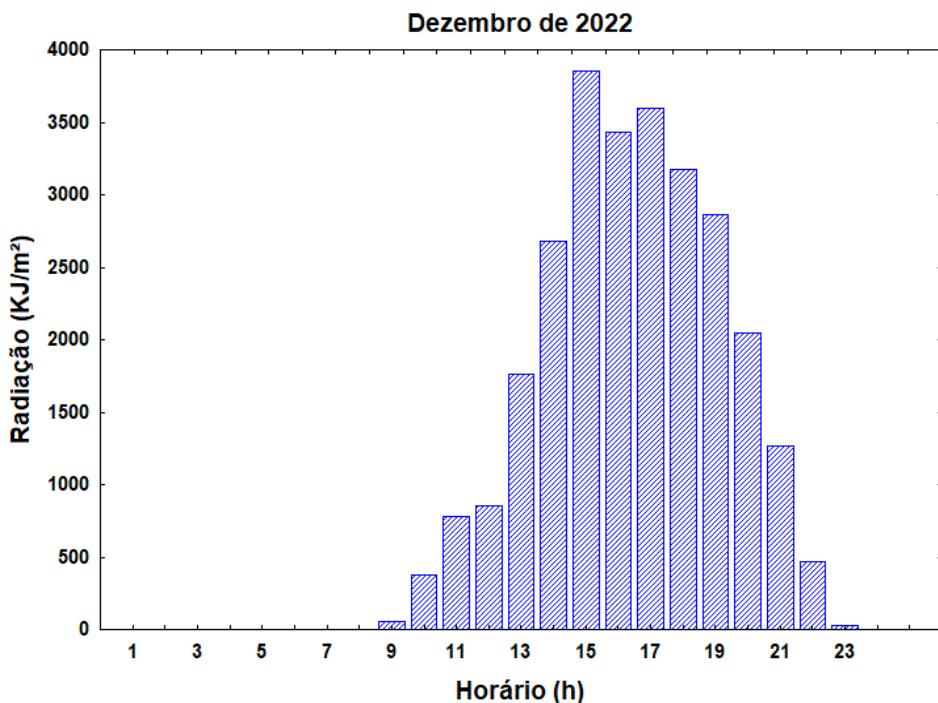
Tabela 2 - Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para dezembro/2022

Ponto	Dados sensor				Dados INMET		
	**T (°C)	**UR (%)	**MP (µg/m <sup>3</sup> )	Horário	T* (° C)	UR (%)	
			MP <sub>2,5</sub>	MP <sub>10</sub>			
1	19	90	2	2	08:29 - 08:44	19,1 ± 0,1	98
2	20	88	7	8	09:43 - 09:58	20,2 ± 0,6	97,5 ± 0,5
3	32,7	77	1	2	17:33 - 17:49	27,6 ± 0,1	62,0 ± 1,0
4	30	71	1	1	14:35 - 15:05	26,1 ± 0,9	66,5 ± 2,5
5	32	75	1	1	17:04 - 17:20	27,6 ± 0,1	62,0 ± 1,0
6	30	65	1	1	16:45 - 17:00	27,7	60,5 ± 0,5
7	31,5	67	3	5	15:15 - 16:09	27,3 ± 0,4	62,0 ± 2,0
8	31,1	76	2	2	15:23 - 15:39	27,3 ± 0,4	62,0 ± 2,0
9	30	79	1	1	18:28 - 18:44	27,1 ± 0,4	65,0 ± 2,0
10	29	79	1	2	18:49 - 18:45	27,1 ± 0,5	65,0 ± 2,0

\*valor médio ± desvio \*\*T -Temperatura; UR-Umidade relativa; MP-Material Particulado.

Fonte: INMET, 2022.

Figura 31 - Dados INMET de Radiação para o dia 05 dezembro 2022



Fonte: Instituto nacional de Meteorologia Estação – INMET, Capão do Leão Pelotas A887

Tabela 3 - Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para janeiro/2023

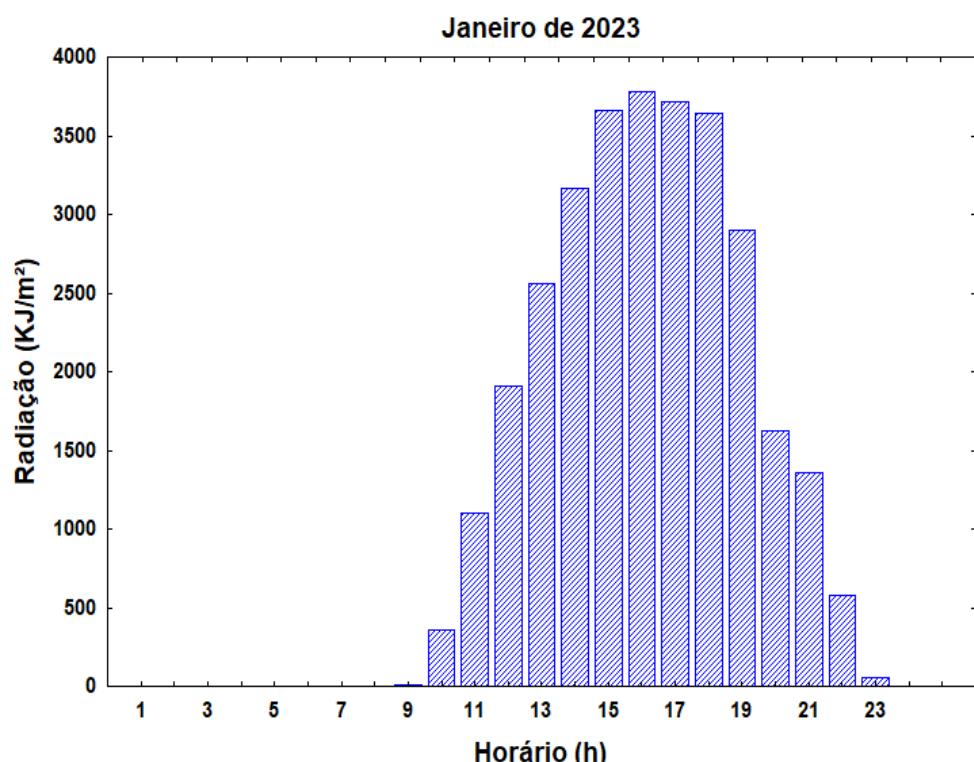
Ponto	Dados sensor				Dados INMET		
	**T (°C)	**UR (%)	**MP (µg/m³)	Horário	T* (° C)	UR (%)	
MP <sub>2,5</sub> MP <sub>10</sub>							
1	36	63	6	8 09:28 - 09:55	19,4 ± 0,3	88,5 ± 0,5	
2	31	58	7	9 10:46 - 11:02	20,9 ± 1,5	88,0 ± 3,0	
3	40	48	2	2 13:44 - 14:00	28,6 ± 1,0	46,0 ± 7,0	
4	37	51	13	19 14:21 - 14:37	30,6 ± 0,9	35,5 ± 3,5	
5	36	58	2	3 15:06 - 15:23	31,6 ± 0,1	33,5 ± 0,5	
6	38	52	2	2 14:47 - 15:05	30,6 ± 0,9	35,5 ± 3,5	
7	35	57	2	3 16:18 - 16:39	32,2 ± 0,5	33,5 ± 0,5	
8	36	53	2	3 15:41 - 15:56	31,6 ± 0,1	33,0 ± 1,0	
9	33	58	1	2 17:03 - 17:19	32,9 ± 0,2	34,0 ± 1,0	

10	33	52	4	4	11:24 - 11:40	23,7 ± 1,4	77,5 ± 7,5
----	----	----	---	---	---------------	------------	------------

\*valor médio  $\pm$  desvio \*\*T -Temperatura; UR-Umidade relativa; MP-Material Particulado.

Fonte: INMET, 2022.

Figura 32 - Dados INMET de Radiação para o dia 23 de janeiro 2023



Fonte: Instituto nacional de Meteorologia Estação – INMET, Capão do Leão Pelotas A887

A Tabela 3 apresenta os dados da qualidade do ar nos pontos de coleta para janeiro/2023. Podemos observar que os valores para  $MP_{2,5}$  variaram entre 1 e 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , com o maior valor registrado no Ponto 4 (13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). A maioria dos Pontos apresentou concentrações entre 2 e 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Já para  $MP_{10}$  os valores oscilaram entre 2 e 19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , com o pico também no Ponto 4 (19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). As temperaturas variaram amplamente, com valores registrados pelos sensores entre 31°C (Ponto 2) e 40°C (Ponto 3), indicando condições de calor intenso em janeiro.

Os dados do INMET registraram temperaturas menores, com médias variando de 19,4°C (Ponto 1) a 32,9°C (Ponto 9). Os valores de umidade relativa foram baixos, variando de 48% (Ponto 3) a 63% (Ponto 1). Dados do INMET mostram tendência a de UR média baixa (<50%) em diversos horários. Cabe salientar que os

horários das medições variaram ao longo do dia. Os maiores níveis de MP foram registrados no início da tarde (Ponto 4), enquanto os menores ocorreram no final da tarde e início da noite (Pontos 8 e 9).

A Figura 32 apresenta os dados de radiação, em que podemos observar picos de radiação solar que ultrapassaram 3700 kJ/m<sup>2</sup> entre 15h e 16h, mantendo-se elevados até às 18h. Ao analisar conjuntamente com os valores da Tabela 3 verificam-se temperaturas mais altas e umidade relativa reduzida nos horários de pico. No entanto as concentrações de MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> permanecem baixas. A radiação intensa, combinada com altas temperaturas, pode ter promovido a dispersão de partículas finas. No entanto, baixos níveis de MP sugerem que a fonte de partículas era limitada (Masiol et al., 2014; Karagulian et al., 2019).

A Tabela 4 apresenta os dados da qualidade do ar nos pontos de coleta para fevereiro/2023. Podemos observar que todas as medições de MP<sub>2,5</sub> ficaram muito baixas, variando de 1 a 2 µg/m<sup>3</sup>. O maior valor foi observado no Ponto 10 (2 µg/m<sup>3</sup>). Para MP<sub>10</sub> os valores variaram entre 2 e 8 µg/m<sup>3</sup>, com o maior valor também registrado no Ponto 10 (8 µg/m<sup>3</sup>). As temperaturas medidas pelos sensores variaram de 18°C (Ponto 1) a 26°C (Ponto 6), com os dados do INMET sendo consistentes, com uma faixa de 18,4°C a 25,4°C.

A umidade relativa medida pelo sensor variou de 68% (Ponto 4) a 82% (Ponto 1), enquanto os dados do INMET mostraram uma média de 67,5% a 98%. As medições ocorreram em diferentes horários do dia, com a maior concentração de material particulado (MP<sub>10</sub>) registrada no Ponto 10, durante o período da noite (18:32 - 19:04).

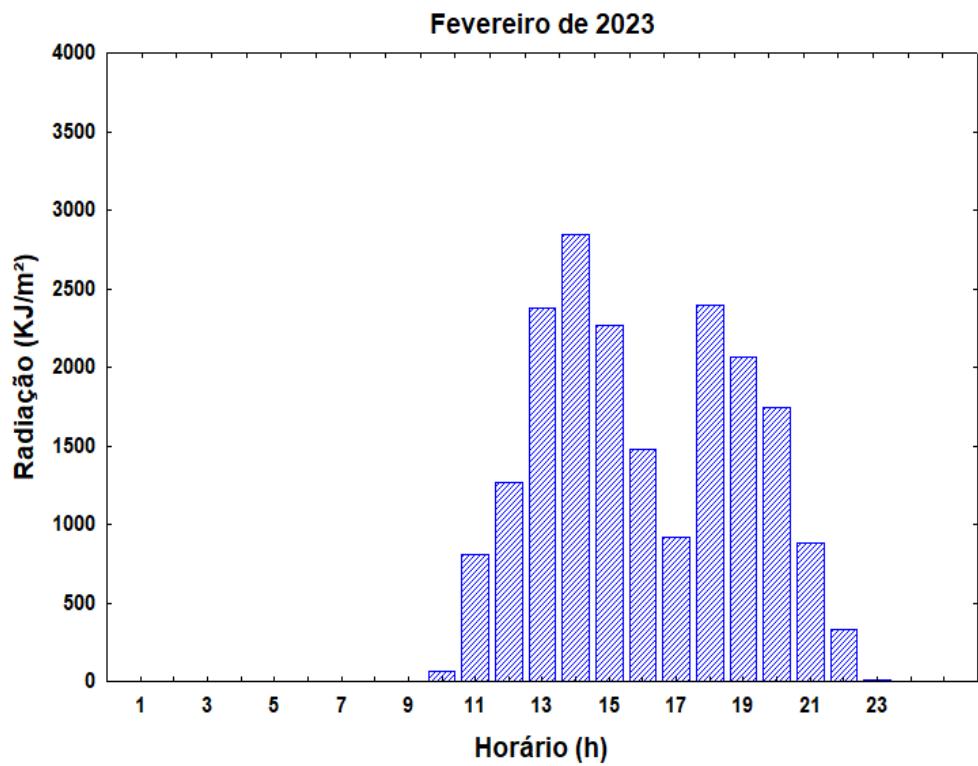
Tabela 4 - Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para fevereiro/2023

Ponto	Dados sensor				Dados INMET		
	**T (°C)	**UR (%)	**MP (µg/m³)	Horário	T* (° C)	UR (%)	
	MP <sub>2,5</sub> MP <sub>10</sub>						
1	18	82	1	2	09:46 - 10:03	18,4 ± 0,0	98,0 ± 0,0
2	25	73	1	2	17:42 - 17:57	24,5 ± 0,7	76,0 ± 7,0
3	25,5	68	1	2	14:42 - 14:58	25,2 ± 0,0	71,0 ± 2,0
4	25	68	1	2	15:06 - 15:21	25,4 ± 0,2	67,5 ± 1,5
5	25	71	1	3	15:29 - 15:44	25,4 ± 0,2	67,5 ± 1,5
6	26	69	1	2	15:48 - 16:04	25,4 ± 0,2	67,5 ± 1,5
7	25,2	72	1	2	17:06 - 17:21	24,5 ± 0,7	76,0 ± 7,0
8	25,2	77	1	2	16:42 - 16:58	24,7 ± 0,9	74,5 ± 8,5
9	25,1	79	1	2	18:13 - 18:28	25,2 ± 0,0	69,0 ± 0,0
10	25,2	76	2	8	18:32 - 19:04	25,2 ± 0,0	69,0 ± 0,0

\*valor médio ± desvio \*\*T -Temperatura; UR-Umidade relativa; MP-Material Particulado.

Fonte: INMET, 2022.

Figura 33 - Dados INMET de Radiação para o dia 21 fevereiro 2023



Fonte: Instituto nacional de Meteorologia Estação – INMET, Capão do Leão Pelotas A887

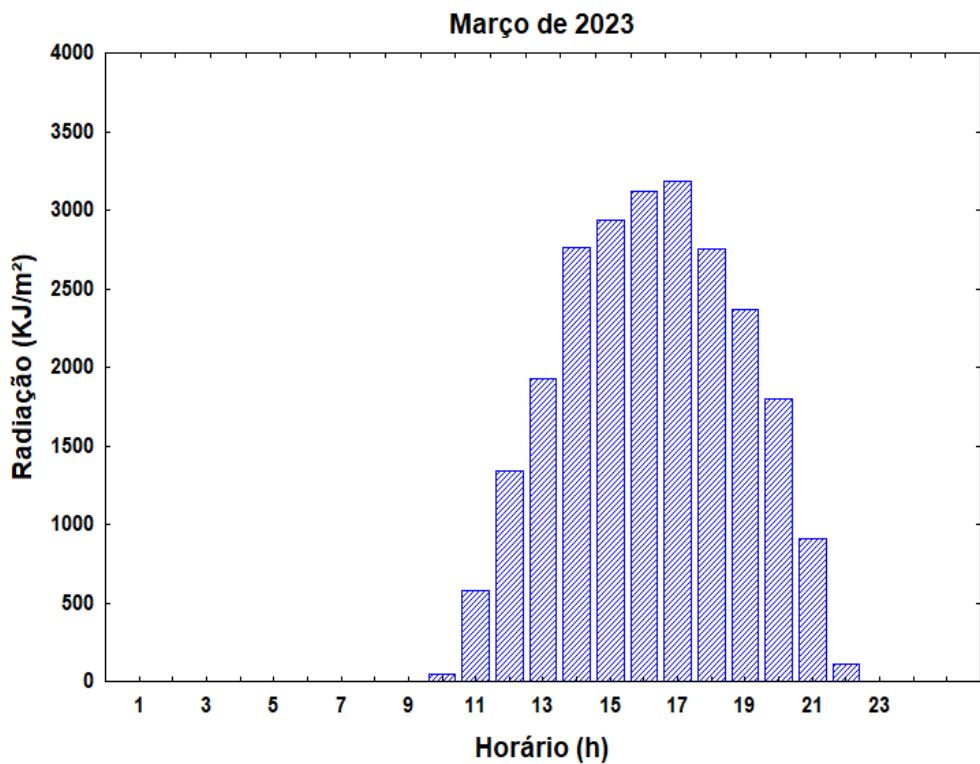
Tabela 5 - Medições da qualidade do ar nos pontos de coleta para março/2023

Ponto	Dados sensor				Dados INMET	
	**T (°C)	**UR (%)	**MP (µg/m³)	Horário	T* (° C)	UR (%)
	MP <sub>2,5</sub> MP <sub>10</sub>					
1	22	85	1	3	09:48 - 10:04	22,8
2	26,6	85	5	6	11:29 - 11:45	25,7 ± 1,0
3	26,6	67	3	4	11:41 - 11:56	25,7 ± 1,0
4	29,9	68	1	2	14:18 - 14:33	29,6 ± 0,4
5	29,5	69	1	2	14:41 - 14:57	29,6 ± 0,4
6	30	65	3	4	15:05 - 15:22	30,0 ± 0,1
7	30,3	69	1	2	15:57 - 16:12	30,0 ± 0,1
8	30,1	69	3	4	15:34 - 15:49	30,0 ± 0,1
9	26,6	70	1	2	13:50 - 14:05	28,6 ± 0,6
10	26,6	71	1	2	13:19 - 13:34	28,6 ± 0,6

\*valor médio ± desvio   \*\*T -Temperatura;   UR-Umidade relativa;   MP-Material Particulado.

Fonte: INMET, 2022.

Figura 34 - Dados INMET de Radiação para o dia 13 março 2023



Fonte: Instituto nacional de Meteorologia Estação – INMET, Capão do Leão Pelotas A887

No que se refere aos dados de radiação (Figura 33) para o dia de coleta pode-se verificar valores máximos de radiação, em torno de 2800 kJ/m<sup>2</sup> ocorrendo entre 13h e 15h, com declínio acentuado após este período. Analisando os níveis de MP (Tabela 4) nesses horários verifica-se que os mesmos mantiveram valores estáveis, mesmo em diferentes condições de temperatura e umidade. Embora a radiação tenha influência na temperatura e na dispersão de partículas, a estabilidade dos níveis de MP pode indicar que a fonte de poluentes não sofreu grandes variações nesse período.

A Tabela 5 apresenta os dados da qualidade do ar nos pontos de coleta para março/2023. Podemos observar que as concentrações de MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> variaram entre 1 e 6 µg/m<sup>3</sup>, com o maior valor registrado no Ponto 2, sendo de 5 µg/m<sup>3</sup> para MP<sub>2,5</sub> e 6 µg/m<sup>3</sup> para MP<sub>10</sub>. Com relação às condições meteorológicas pode-se verificar que as temperaturas medidas pelos sensores variaram de 22°C (Ponto 1) a 30,3°C (Ponto 7), alinhadas com os dados do INMET, que variaram de 22,8°C a 30°C. Já a umidade relativa apresentou variações entre 65% (Ponto 6) e 85% (Ponto 1), com os dados do INMET confirmando uma UR média de 67% a 96%. As

medidas foram realizadas ao longo de diferentes períodos do dia, com os maiores valores de material particulado ( $MP_{2,5}$  e  $MP_{10}$ ) registrados no final da manhã (Ponto 2, às 11:29 - 11:45). A Figura 34 apresenta os dados de radiação para o dia da coleta no mês de março. Podemos verificar que a radiação ultrapassou 3000  $kJ/m^2$  entre 15h e 17h. Ao mesmo tempo em que as temperaturas acima de 30°C foram registradas nos horários de maior radiação (Tabela 5), no entanto os níveis de MP permaneceram estáveis.

As medições de material particulado (MP) apresentadas nas Tabelas 1 a 5, em conjunto com os dados de radiação solar, forneceram informações relevantes sobre a dinâmica da qualidade do ar em diferentes meses e horários de coleta. Comparando os valores observados com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que estipula limites de  $MP_{10}$  em 120  $\mu g/m^3$  (média de 24 horas) e  $MP_{2,5}$  em 60  $\mu g/m^3$  (média de 24 horas), percebemos que os valores obtidos em intervalos de 15 minutos são inferiores a esses limites. Contudo, se fosse possível extrapolar os valores de MP para um período de 24 horas, estes níveis de material particulado podem se aproximar ou exceder os valores de referência.

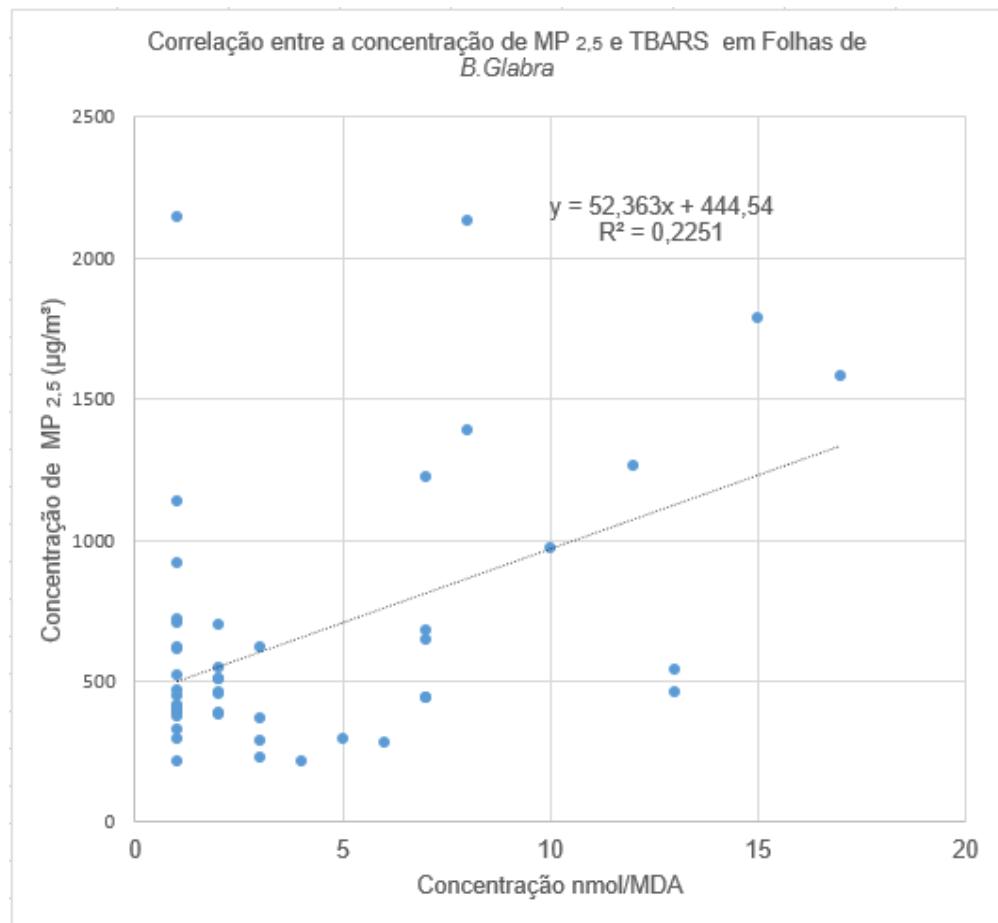
Além disso, os picos de radiação observados nas Figuras 30 a 34 sugerem uma relação direta com a dispersão e dinâmica do material particulado. Uma vez que o aumento da radiação durante as horas centrais do dia pode intensificar movimentos convectivos na atmosfera, facilitando a dispersão dos poluentes e, consequentemente, reduzindo a concentração de material particulado ao nível do solo (CETESB, 2019; Magi et al., 2019). Essa relação entre radiação, horário e concentração de material particulado destaca a importância de monitoramentos contínuos e da consideração de variabilidades temporais para avaliações precisas da qualidade do ar em comparação aos padrões regulatórios.

#### 6.4 Correlação pelo Método de Pearson entre Material Particulado e TBARS

A análise do gráfico na Figura 35 revela uma correlação positiva fraca entre os níveis de  $MP_{2,5}$  e os valores de TBARS, com um coeficiente de determinação ( $R^2=0,2251$ ), indicando que aproximadamente 22,51% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação nos níveis de  $MP_{2,5}$ . Essa correlação relativamente baixa sugere que, embora exista uma tendência de aumento nos valores de TBARS com o aumento dos níveis de  $MP_{2,5}$ , essa relação não é

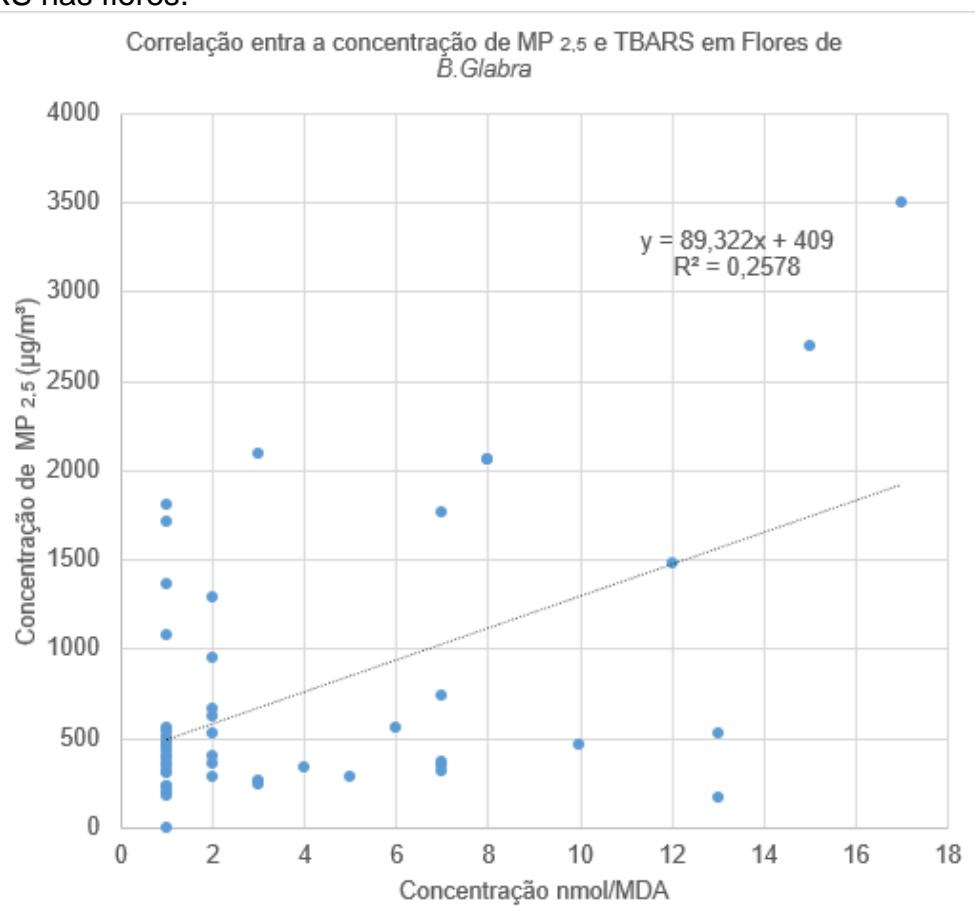
consistente em todos os pontos analisados. Além disso, a maioria dos pontos concentra-se em níveis baixos de  $MP_{2,5}$  (entre 0 e 5), enquanto os valores de TBARS apresentam alta variabilidade, o que indica a provável influência de outros fatores além do  $MP_{2,5}$ .

Figura 35 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de  $MP_{2,5}$  e os valores de TBARS nas folhas.



A Figura 36, apresenta a análise do gráfico de correlação entre  $MP_{2,5}$  e TBARS em flores revela uma correlação moderada, com um coeficiente de determinação ( $R^2=0,2578$ ), indicando que aproximadamente 25,78% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação nos níveis de  $MP_{2,5}$ . Embora essa correlação ainda seja considerada fraca, é mais pronunciada do que as observadas para folhas e brácteas, sugerindo uma maior sensibilidade das flores à presença de partículas finas. A distribuição dos dados mostra uma concentração predominante de pontos em níveis baixos de  $MP_{2,5}$  (entre 0 e 5), com considerável dispersão nos valores de TBARS, mas há indícios de que valores mais altos de TBARS estão associados a níveis mais elevados de  $MP_{2,5}$ .

Figura 36 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de  $MP_{2,5}$  e os valores de TBARS nas flores.



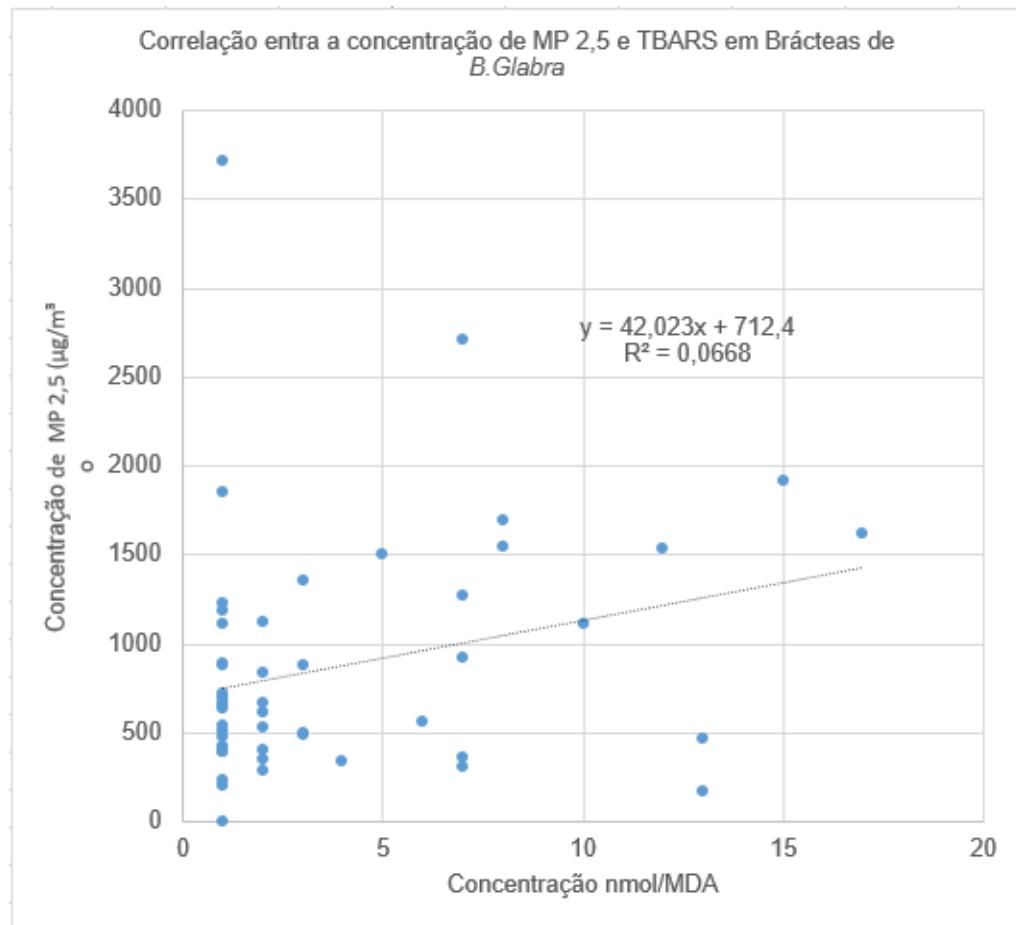
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A linha de tendência aponta para um aumento gradual dos valores de TBARS conforme os níveis de  $MP_{2,5}$  aumentam, o que reforça a hipótese de que as flores

respondem de maneira mais consistente a esse poluente. Este comportamento sugere que as flores podem ser bioindicadores mais eficientes da poluição por partículas finas quando comparadas a folhas e brácteas. Contudo, como o  $R^2$  permanece relativamente baixo, é provável que outros fatores ambientais ou biológicos estejam influenciando os resultados. Portanto, são necessárias investigações adicionais para confirmar essa hipótese e compreender melhor os mecanismos subjacentes a essa correlação.

A análise do gráfico de correlação entre  $MP_{2,5}$  e TBARS em brácteas (Figura 37) demonstra uma correlação extremamente fraca, com um coeficiente de determinação ( $R^2=0,0668$ ), indicando que apenas cerca de 6,68% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação nos níveis de  $MP_{2,5}$ . A distribuição dos dados revela uma alta concentração de pontos em níveis baixos de PM2.5 (entre 0 e 5), mas com ampla variação nos valores de TBARS, sugerindo a influência de fatores adicionais não considerados na análise. Embora exista uma leve tendência ascendente nos valores de TBARS à medida que o  $MP_{2,5}$  aumenta, a correlação é fraca e insuficiente para se estabelecer uma relação significativa.

Figura 37 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de MP<sub>2,5</sub> e os valores de TBARS nas brácteas.



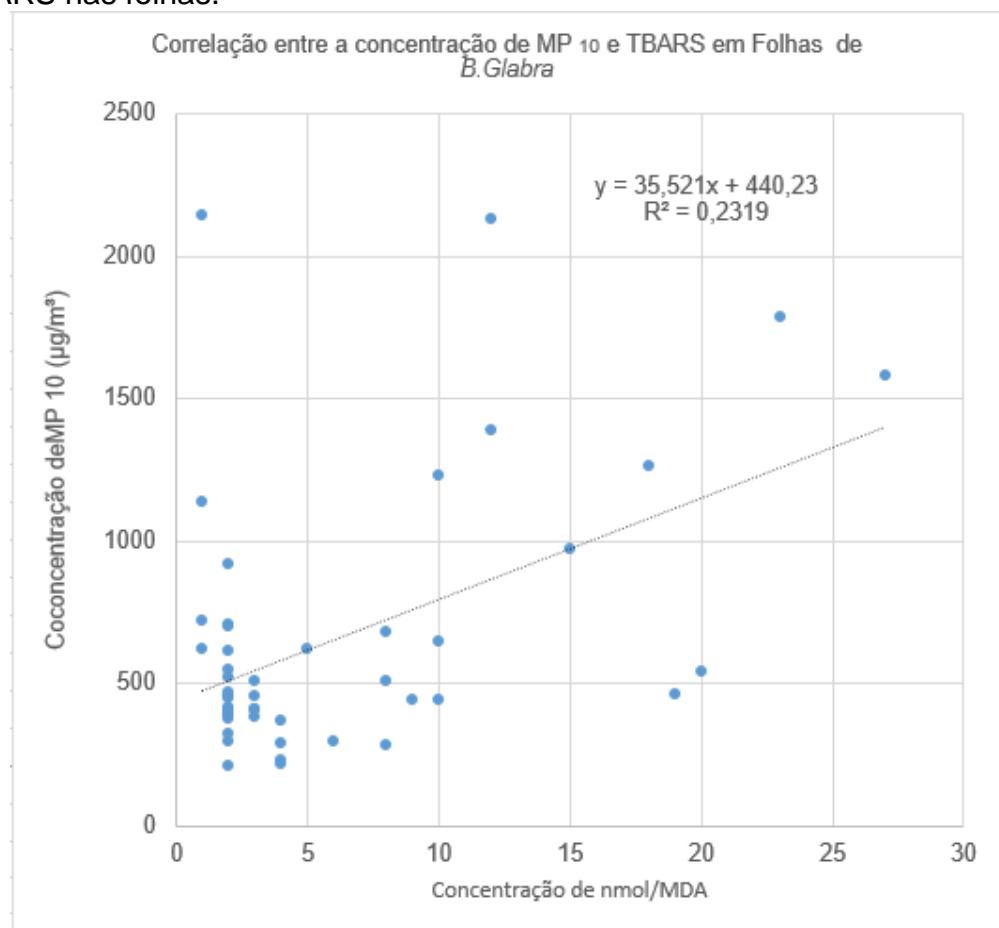
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Comparativamente, a correlação entre MP<sub>2,5</sub> e TBARS nas brácteas é consideravelmente menor do que nas flores e folhas, indicando que as brácteas respondem de maneira menos consistente à presença de partículas finas. A baixa sensibilidade observada sugere que as brácteas não são bons bioindicadores de poluição por MP<sub>2,5</sub> no ambiente urbano. Portanto, é provável que fatores ambientais ou biológicos distintos estejam influenciando os níveis de TBARS nas brácteas, reforçando a necessidade de estudos adicionais para identificar variáveis relevantes que possam impactar esse marcador de estresse oxidativo.

A Figura 38 fornece a análise da correlação entre MP<sub>10</sub> e TBARS em folhas revela uma relação moderada, com um coeficiente de determinação ( $R^2=0,2319$ ) indicando que aproximadamente 23,19% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação nos níveis de MP<sub>10</sub>. Embora a correlação não seja forte, ela é mais significativa do que a observada em outros órgãos vegetais. A maioria

dos pontos se concentra em níveis baixos de MP<sub>10</sub> (entre 0 e 5), com dispersão elevada nos valores de TBARS. Contudo, níveis mais altos de MP<sub>10</sub> mostram uma tendência mais clara de aumento nos valores de TBARS, o que é reforçado pela linha de tendência ascendente.

Figura 38 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de MP<sub>10</sub> e os valores de TBARS nas folhas.

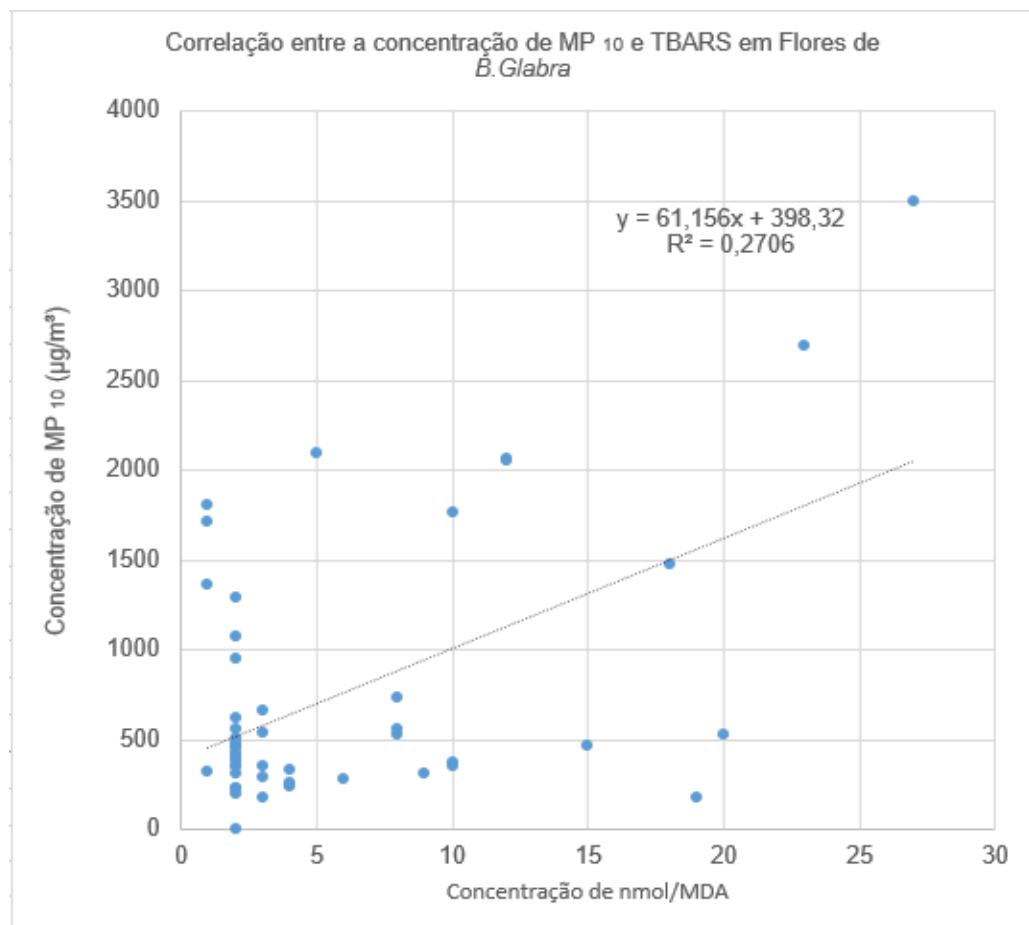


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Apesar do coeficiente de determinação ser moderado, a análise sugere que folhas respondem a concentrações mais elevadas de MP<sub>10</sub>, apresentando um aumento nos níveis de TBARS à medida que o MP<sub>10</sub> aumenta. Comparado com os resultados obtidos para MP<sub>2,5</sub>, o MP<sub>10</sub> parece ter uma influência semelhante sobre os valores de TBARS em folhas. No entanto, a variabilidade dos dados indica que outros fatores ambientais ou biológicos, ainda não considerados, podem estar interferindo na resposta oxidativa medida pelo TBARS, o que demanda estudos complementares para melhor compreensão dessa dinâmica.

Com relação a Figura 39, a análise da correlação entre MP<sub>10</sub> e TBARS em flores revela uma relação moderada, com um coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,2706$ ) indicando que cerca de 27,06% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação nos níveis de MP<sub>10</sub>. Embora a dispersão dos dados seja significativa, especialmente em concentrações baixas de MP<sub>10</sub> (entre 0 e 5), há uma tendência mais clara de aumento nos valores de TBARS em concentrações mais elevadas de MP<sub>10</sub> (acima de 10). A linha de tendência reforça essa relação ascendente, sugerindo uma resposta positiva do estresse oxidativo em flores com o aumento do MP<sub>10</sub>.

Figura 39 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de MP<sub>10</sub> e os valores de TBARS nas flores.



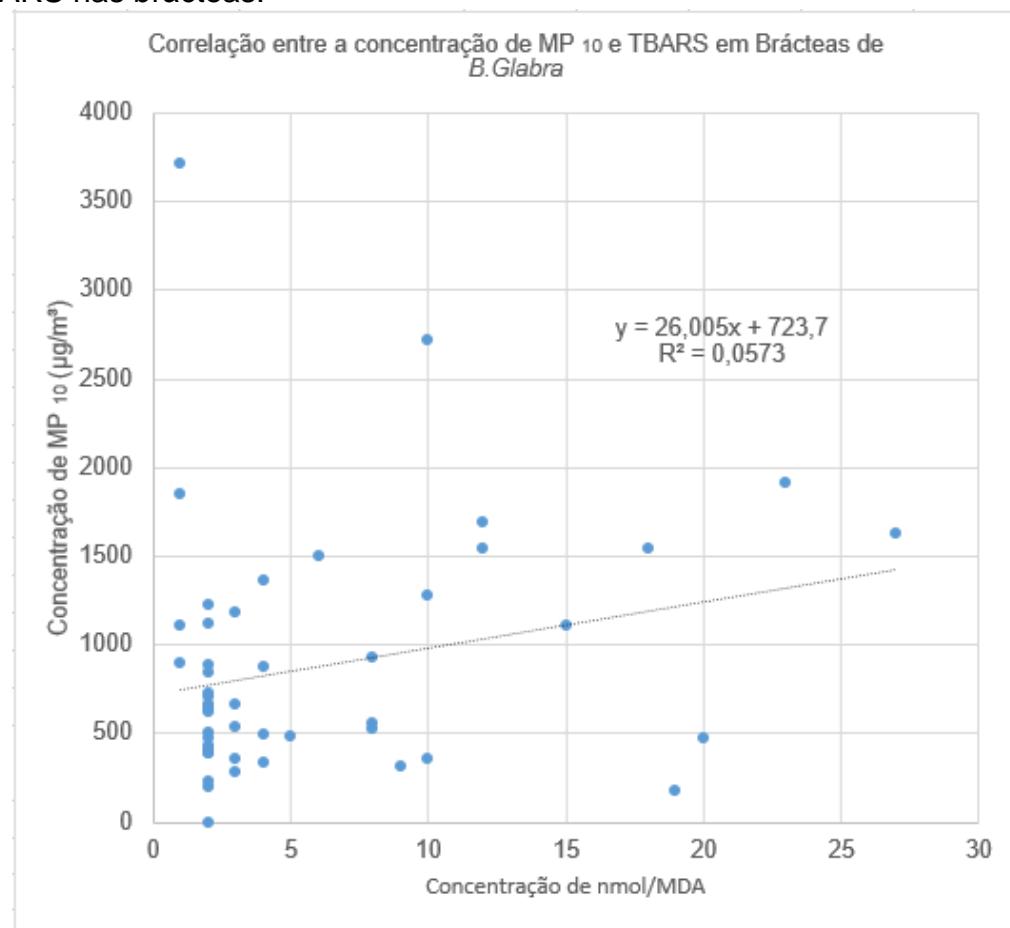
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Comparado com a correlação observada em folhas ( $R^2 = 0,2319$ ), o coeficiente obtido para flores é ligeiramente maior, indicando que as flores podem

ser mais sensíveis ao aumento de  $MP_{10}$ . Esse comportamento pode estar relacionado a características morfológicas ou fisiológicas que tornam as flores mais suscetíveis ao acúmulo de poluentes atmosféricos. Embora o coeficiente de determinação não seja elevado, a tendência positiva detectada sugere que as flores são melhores bioindicadores da presença de  $MP_{10}$  do que as folhas, exigindo, no entanto, investigações complementares para compreender adequadamente os fatores que influenciam essa correlação.

Por fim, a análise da correlação entre  $MP_{10}$  e TBARS em brácteas na Figura 40, evidencia uma relação extremamente fraca, com um coeficiente de determinação ( $R^2=0,0573$ ) indicando que apenas cerca de 5,73% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação nos níveis de  $MP_{10}$ . Os dados apresentam grande dispersão, especialmente em concentrações mais baixas de  $MP_{10}$  (entre 0 e 5), e mesmo em níveis mais elevados de  $MP_{10}$ , a variabilidade dos valores de TBARS permanece significativa. Embora exista uma leve tendência ascendente demonstrada pela linha de tendência, essa relação é muito fraca e pouco representativa.

Figura 40: Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de MP<sub>10</sub> e os valores de TBARS nas brácteas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

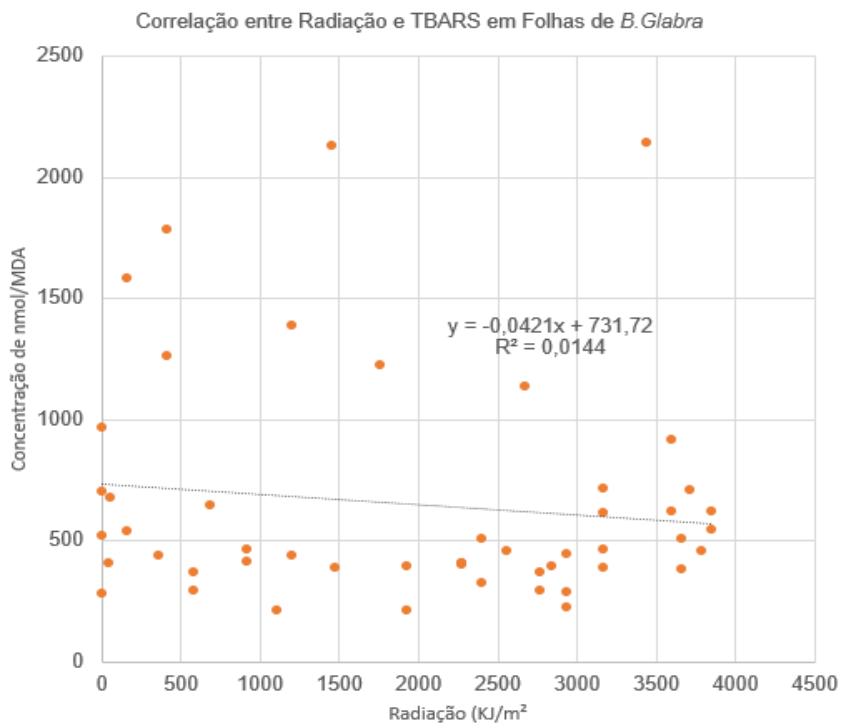
Esse gráfico apresenta o menor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dentre todos os gráficos analisados, sugerindo que as brácteas são as menos afetadas pelos níveis de MP<sub>10</sub>. Essa baixa correlação implica que o MP<sub>10</sub> não é um fator determinante para o aumento dos níveis de TBARS em brácteas, possivelmente devido a características morfológicas ou fisiológicas que tornam esse tecido menos sensível à poluição particulada. Assim, é recomendável investigar outras variáveis ambientais ou biológicas que possam influenciar os níveis de TBARS nesse tecido específico.

## 6.5 Correlação entre a radiação e TBARS

A figura 41, que relaciona radiação e TBARS em folhas apresenta uma correlação extremamente fraca, com um coeficiente de determinação ( $R^2=0,0144$ )

indicando que apenas cerca de 1,44% da variação nos valores de TBARS pode ser explicada pela variação na radiação.

Figura 41 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de Radiação e os valores de TBARS nas folhas.



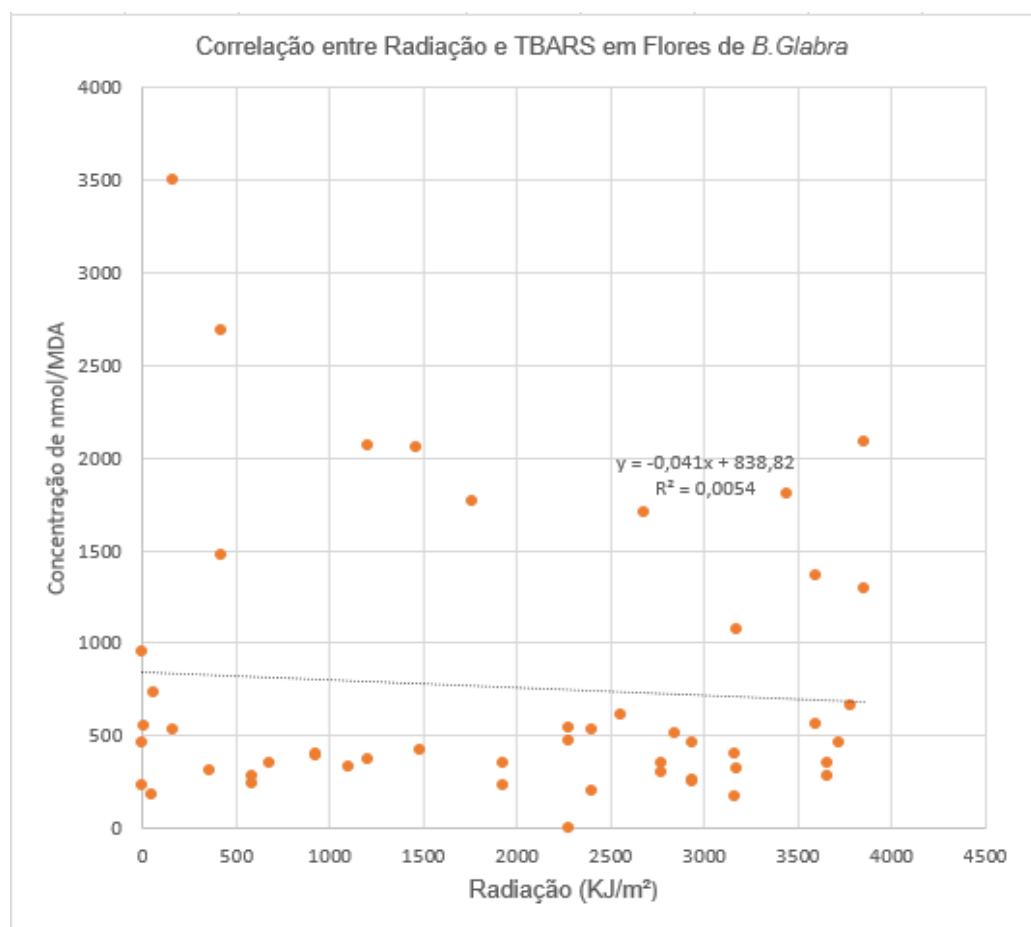
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A linha de tendência mostra uma leve inclinação negativa, sugerindo uma possível relação inversa entre as variáveis, embora essa tendência seja praticamente irrelevante dado o baixo valor de  $R^2$ . A dispersão dos pontos é elevada e não apresenta um padrão claro que possa indicar uma correlação significativa.

A ausência de correlação relevante sugere que a radiação não é um fator determinante na variação dos níveis de TBARS em folhas no presente estudo. Essa falta de associação pode indicar que os valores de TBARS nas folhas são mais influenciados por outros fatores ambientais, como poluição particulada ou condições climáticas, que não foram considerados nesta análise. Investigações adicionais que incluam outras variáveis e um maior número de amostras podem ajudar a esclarecer os possíveis fatores responsáveis pela variação dos níveis de TBARS.

Na Figura 42, a correlação Radiação e TBARS em flores apresenta uma correlação extremamente fraca, evidenciada pelo coeficiente de determinação  $R^2=0,0054$ . Isso indica que apenas cerca de 0,54% da variação nos níveis de TBARS pode ser explicada pela variação na radiação, sugerindo que não há uma relação significativa entre essas variáveis. A linha de tendência é praticamente horizontal, o que confirma a ausência de uma correlação relevante. Além disso, os pontos apresentam ampla dispersão, especialmente em níveis baixos e altos de radiação, sem um padrão consistente que possa indicar uma relação direta. Portanto, é provável que os níveis de TBARS em flores sejam influenciados predominantemente por outros fatores ambientais ou biológicos que não foram considerados nesta análise.

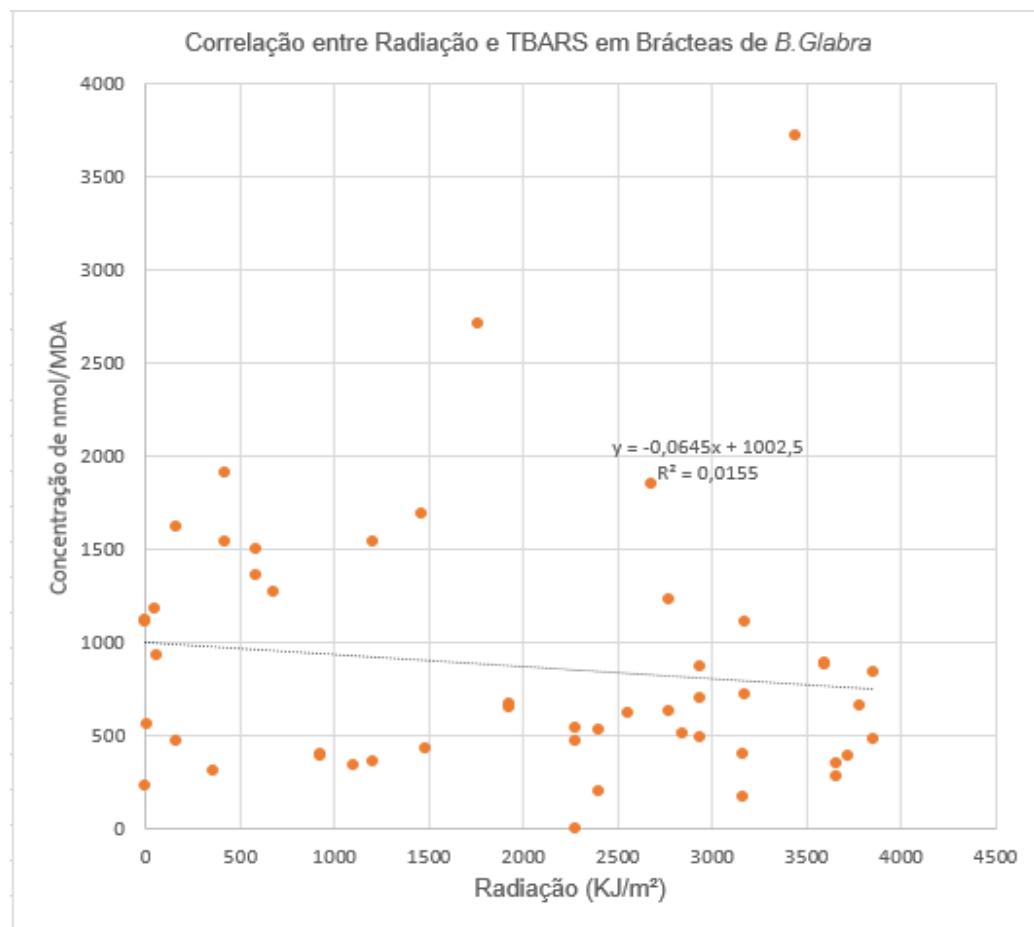
Figura 42 - Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de Radiação e os valores de TBARS nas flores.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Como pode ser visto na Figura 43, a correlação entre radiação e TBARS em brácteas evidencia uma relação extremamente fraca, conforme indicado pelo coeficiente de determinação ( $R^2=0,0155$ ). Este valor sugere que apenas 1,55% da variação nos níveis de TBARS pode ser atribuída às variações na radiação, indicando uma correlação praticamente inexistente. A dispersão significativa dos pontos ao longo do gráfico, especialmente em baixos níveis de radiação (0 a 1000), reforça a ausência de um padrão consistente que possa indicar uma associação relevante entre essas variáveis.

Figura 43 :- Correlação pelo método de Pearson entre os níveis de Radiação e os valores de TBARS nas brácteas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Ainda que a linha de tendência apresenta uma inclinação negativa sutil, sugerindo um possível decréscimo dos níveis de TBARS com o aumento da radiação, tal tendência é negligenciável dado o baixíssimo coeficiente de

determinação. Os resultados obtidos indicam que a radiação não exerce influência relevante sobre os níveis de TBARS em brácteas, sugerindo a necessidade de investigação de outros fatores ambientais ou biológicos que possam contribuir para as variações observadas.

## 7. Considerações finais

Este estudo demonstra que a *Bougainvillea glabra* responde de forma sensível à poluição atmosférica urbana através de ajustes bioquímicos específicos dos órgãos. Os aumentos observados na atividade do malondialdeído (MDA) e da superóxido dismutase (SOD), juntamente com a modulação da catalase (CAT) e da glutationa peroxidase (GPx), indicam uma resposta antioxidante coordenada à exposição a partículas em suspensão. Esses padrões enzimáticos e oxidativos foram consistentes em todos os locais urbanos e estações do ano, confirmando a capacidade da planta de refletir variações de curto prazo na qualidade do ar.

A radiação demonstrou correlações extremamente fracas com os níveis de malondialdeído (MDA) em todos os tecidos analisados, sugerindo que este fator não é determinante para a variação do estresse oxidativo nas condições avaliadas. Alguns dos espécimes apresentaram alterações na sua morfologia com ocorrências de alterações fisiológicas (necrose, presença de fungos fitopatogênicos e lagartas).

As folhas e flores provaram ser os órgãos mais responsivos, exibindo maior atividade oxidativa e correlações mais fortes com as concentrações de partículas em suspensão. As brácteas mostraram sensibilidade limitada, enfatizando que seu papel estrutural oferece maior proteção, mas menor reatividade bioquímica. A capacidade da espécie de recuperar o equilíbrio enzimático após picos de exposição também resalta sua resiliência, uma característica importante para o monitoramento ambiental de longo prazo.

Dada sua ampla distribuição, apelo ornamental e sensibilidade bioquímica mensurável, a *B. glabra* surge como um bioindicador prático, sustentável e confiável para avaliar a poluição por partículas em ecossistemas urbanos. A combinação do monitoramento de Material Particulado em campo e marcadores oxidativos em nível tecidual fornece uma estrutura econômica e ecologicamente relevante para avaliar a qualidade do ar.

Pesquisas futuras devem expandir essa abordagem, integrando parâmetros fisiológicos, anatômicos e moleculares para refinar a capacidade preditiva da *B. glabra* e validar seu uso em outras regiões urbanas em todo o mundo.

## 8.Referências Bibliográficas

- ABARCA-VARGAS, R.; PETRICEVICH, V. L. *Bougainvillea* genus: a review on phytochemistry, pharmacology, and toxicology. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, v. 2018, p. 1–17, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/9070927>. Acesso em: 24 jun. 2023.
- ALBUQUERQUE, C.; JOTZ, M. B.; TAVARES, V. B.; CONTRERAS, S.; DYE, T.; MARCELO, A.; CAMPOS, M. S. Measuring PM2.5 with low-cost sensors. WRI Practice Note, São Paulo, p. 1–31, mar. 2021.
- ALMEIDA, M. B. Uso do biomarcador malondialdeído em análises de estresse oxidativo em diversos modelos experimentais. 2024. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/items/fc2735cf-3078-4eee-af26-806f14ad1897>. Acesso em: 30 mar. 2025.
- AL-KINDI, S. G.; BROOK, R. D.; BISWAL, S.; RAJAGOPALAN, S. Environmental determinants of cardiovascular disease: lessons learned from air pollution. *Nature Reviews Cardiology*, v. 17, p. 656–672, mai. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41569-020-0371-2>. Acesso em: 20 mai. 2022.
- AGUILAR DIAZ DE LEON, J., BORGES, C.R. Evaluation of Oxidative Stress in Biological Samples Using the Thiobarbituric Acid Reactive Substances Assay. *J Vis Exp.*, 2020 May 12; v.159: 10.3791/61122. doi: 10.3791/61122. PMID: 32478759; PMCID: PMC9617585.
- AHMED, A. H. New flavone from the aerial parts of *Bougainvillea glabra*. *IJCER Online*, 2014. Disponível em: [http://www.ijceronline.com/papers/Vol4\\_issue10/Version-2/A041020105.pdf](http://www.ijceronline.com/papers/Vol4_issue10/Version-2/A041020105.pdf). Acesso em: 20 nov. 2020.
- ANZE, R.; et al. Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, v. 1, p. 53–74. Disponível em: [https://cebem.org/revistaredesma/vol1/pdf/redesma0101\\_art03.pdf](https://cebem.org/revistaredesma/vol1/pdf/redesma0101_art03.pdf). Acesso em: 11 jun. 2021.
- AQUINO, S. M. de F.; et al. Bioindicadores vegetais: Uma alternativa para monitorar a poluição. *RIC – Revista Internacional de Ciências*, Rio de Janeiro, RJ, 2011. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/3629>. Acesso em: 10 fev. 2021.
- ARANDA-RIVERA, A. K., CRUZ-GREGORIO, A., ARANCIBIA-HERNÁNDEZ, Y. L., HERNÁNDEZ-CRUZ, E. Y., & PEDRAZA-CHAVERRI, J. (2022). RONS and Oxidative Stress: An Overview of Basic Concepts. *Oxygen*, v. 2, n.4, p.437-478. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/oxygen2040030>. Acesso em: 30 mar. 2025

AZZAZY, M. F. Plant bioindicators of pollution in Sadat City, Western Nile Delta, Egypt. PLoS ONE, 2020. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0226315>. Acesso em: 20 nov. 2020.

BALMES JR. Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health. *J Allergy Clin Immunol*, v. 143, n. 6, p. 1979-1987, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2019.04.016>. PMID: 31176380. Acesso em: 18 jun. 2024.

BAYOULI, I. T.; BAYOULI, H. T.; DELL'OCA, A.; MEERS, E.; SUN, J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators*, v. 125, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21001734>. Acesso em: 20 abr. 2023.

BEWLEY, J. D. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, v. 9, p. 1055–1066, 1997. Disponível em: <https://academic.oup.com/plcell/article-abstract/9/7/1055/5986415?redirectedFrom=fulltext&login=false>. Acesso em: 30 out. 2024.

BEWLEY, J. D.; BLACK, M. *Seeds: physiology of development and germination*. Plenum Press, 1994. 445 p.

BOOGAARD, H., WALKER, K., COHEN, A. J. Air pollution: the emergence of a major global health risk factor. *Int Health*, v. 11, n. 6, p. 417-421, nov. 2019. Disponível em: <https://academic.oup.com/inthealth/article/11/6/417/5587652?login=true>. Acesso em: 28 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Brasília, Diário Oficial da União – DOU. Publicado em: 21 de nov. de 2018 | Edição: 223 | Seção: 1 | Página: 155. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/web/guest/materia-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603](https://www.in.gov.br/web/guest/materia-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603)>. Acesso em 14 mai. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Poluentes Atmosféricos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos.html>>. Acesso em 8 abr. 2022

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução CONAMA nº 03, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília, Diário Oficial da União – DOU. Publicado em 22 de agosto de 1990 | Seção 1 | Páginas 15937-15939. Disponível em: <[https://www.ibram.df.gov.br/images/resol\\_03.pdf](https://www.ibram.df.gov.br/images/resol_03.pdf)>. Acesso em 14 maio 2021.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. "Poza Rica". Enciclopédia Britânica, 2013. Disponível em: <<https://www.britannica.com/place/Poza-Rica>> Acesso em: 30 abril 2021.

- BROUGHTON, Edward. The Bhopal disaster and its aftermath: a review. *Environmental Health*, London, v. 4, n. 6, 2005. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1142333/>. Acesso em: 10 abr. 2021.
- BURNETT, R., et. al.. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc Natl Acad Sci U S A*, v. 115, n. 38, p. 9592-9597, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30181279/>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- CARNEIRO, R. M. A.; TAKAYANAGUI, A. M. M. Estudos sobre bioindicadores vegetais e poluição atmosférica por meio de revisão sistemática da literatura. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 13, p. 26–44, 2009. Disponível em: [https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes\\_RBCIAMB/article/view/406](https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/406). Acesso em: 28 dez. 2020.
- CALDEIRA, D., FRANCO, F., BAPTISTA, S.B., CABRAL, S., CACHULO, M.C., DORES, H., PEIXEIRO, A., RODRIGUES, R., SANTOS, M., TIMÓTEO, A.T., VASCONCELOS, J., GONÇALVES, L. Air pollution and cardiovascular diseases: A position paper. *Revista Portuguesa de Cardiologia*, v. 41, n. 8, p. 709-717, 2022. doi: 10.1016/j.repc.2022.05.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0870255122002530>.
- CARTER, E., et. al.. Assessing Exposure to Household Air Pollution: A Systematic Review and Pooled Analysis of Carbon Monoxide as a Surrogate Measure of Particulate Matter. *Environ Health Perspect.*, 2017 Jul 28; 125(7): 076002. doi: 10.1289/EHP767. PMID: 28886596; PMCID: PMC5744652.
- CAMERON, R. W. F.; HARRISON-MURRAY, R. S.; ATKINSON, C. J.; JUDD, H. L. Regulated deficit irrigation – a means to control growth in woody ornamentals. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, v. 81, n. 3, p. 435–443, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14620316.2006.11512085>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- CIRILLO, C.; ROUPHAEL, Y.; CAPUTO, R.; RAIMONDI, G.; DE PASCALE, S. Water stress responses of five potted *Bougainvillea* genotypes. *Acta Horticulturae*, v. 1107, p. 203–208, 2015.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Biomonitoramento da vegetação na região de Cubatão: fluoreto, cádmio, chumbo, mercúrio e níquel. 2015. Disponível em: <[https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/Veg\\_Web\\_24-04.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/Veg_Web_24-04.pdf)> Acesso em: 12 mai 2020.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/07/Relat%C3%A3o-de-Qualidade-do-Ar-2019.pdf>. Acesso em 4 jul 2023.

DAELLENBACH, K.R., et. al. Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature*, v. 587, p. 414–419, 2020. doi: 10.1038/s41586-020-2902-8.

DAIBER, A.; KUNTIC, M.; HAHAD, O.; DELOGU, L. G.; ROHRBACH, S.; DI LISA, F.; SCHULZ, R.; MÜNZEL, T. Effects of air pollution particles (ultrafine and fine particulate matter) on mitochondrial function and oxidative stress - Implications for cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, v. 696, nov. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33159890/>. Acesso em: 20 mai. 2022.

DANCEY, C.P.; REIDY, J.; VIALI, L. Estatística sem matemática para psicologia. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013. 608 p. ISBN 978-85-65848-18-3. Disponível em: [https://bibliotecaweb.unicesumar.edu.br/pesquisa\\_geral?q=Dancey%252C%2520Christine%2520P&for=AUTOR](https://bibliotecaweb.unicesumar.edu.br/pesquisa_geral?q=Dancey%252C%2520Christine%2520P&for=AUTOR). Acesso em: 07 out. 2025.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, v. 30, n. 86, p. 83–97, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v30n86/0103-4014-ea-30-86-00083.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

DERISIO, J.C. Introdução ao controle de poluição ambiental. 2. ed., São Paulo: Signus, 2000 p. 87-128.

EL-CHAGHABY, G. A.; RASHAD, S.; EL-KADER, S. F. A. Dried Leaves of *Bougainvillea glabra* Plant for the Removal of Lead Ions from Aqueous Solution by Adsorption. *Egyptian Journal of Botany*, v. 60, n. 3, p. 707–718, 2020. Disponível em: <http://ejbo.journals.ekb.eg/>. Acesso em: 23 jun. 2023.

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - FEPAM. Monitoramento da Qualidade do Ar. Rio Grande do Sul, 2018. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/poluentes.asp>>. Acesso em: 23 mai 2022.

FINK, J.R; TIECHER, T. Manejo e recuperação de áreas degradadas. Curitiba. IFSul Paraná, 2017.

GALVÃO FILHO, J.B. Controle da poluição ambiental: Cubatão, filosofia e conceito. *Ambiente - Revista CETESB de Tecnologia*, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 70-3, 1987. Disponível em: <https://revista.cetesb.sp.gov.br/revista/article/view/22>. Acesso em: 14 mar. 2025.

GAGNÉ, F. Oxidative Stress. In: *Biochemical Ecotoxicology. Principles and Methods*. p.103–115, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/b9780124116047000064>. Acesso em: 23 abr. 2023.

GALETTI, G. D.; FEITOSA, O. M.; VIANNA, J. C. T.; ALONSO, M. F.; CARVALHO, J. C. Desenvolvimento e aplicação de uma estação de qualidade do ar de baixo custo para monitorar a concentração de material particulado. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 12, p. 101272–101287, dez. 2020. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/22057>. Acesso em: 23 abr. 2023.

GIANNOPOLITES, C.; RIES, K. S. Superoxide dismutases: occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, Michigan, v. 59, p. 309–314, 1977. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/59/2/309/6075837>. Acesso em: 15 fev. 2022.

GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*, v. 396, n. 10258, p. 1223-1249, 2020. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2. PMID: 33069327; PMCID: PMC7566194. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(20\)30752-2/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(20)30752-2/fulltext). Acesso em: 03 mar. 2025.

GOUVEIA, N.; et al. Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. *Caderno de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 12, p. 2669–2677. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-311X2006001200016&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2006001200016&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 18 abr. 2021.

GUARNIERI, M.; BALMES, J. R. Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, v. 3, n. 383, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24792855/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

GUERRIERI, N.; FANTOZZI, A.; ORRÙ, A. M. Lichens and Phytobenthos Bioindicators of Pollution. *Open Access Journal of Waste Management & Xenobiotics*, National Research Council-Water Research Institute (CNR-IRSA), Verbania, Italy. Disponível em: <https://www.medwinpublishers.com/OAJWX/160000138>. Acesso em: 17 jun. 2021.

GUTIÉRREZ, F.; RIVERO-MORAGREGA, P. Oxidative Stress: Love and Hate History in Central Nervous System. *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*, v. 108, p. 1–31, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1876162317300032>. Acesso em: 23 abr. 2023.

GUPTA, V.; GEORGE, M.; SINGHAL, M.; JOSEPH, L.; ARYA, H. Pharmacognostical Evaluation of the Leaf of *Bougainvillea glabra* 'Snow White'. *Journal of Pharmacy Research*, v. 2, n. 11, p. 1775–1779, 2009.

HADLEY, M.B., BAUMGARTNER, J., VEDANTHAN, R. Developing a Clinical Approach to Air Pollution and Cardiovascular Health. *Circulation*, 2018 Feb 13; v. 137, n. 7, p. 725-742. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.030377. PMID: 29440198; PMCID: PMC5950725.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE. 2024. *State of Global Air 2024*. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. Disponível em: <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>. Acesso em: 28 mar. 2025.

- JANHALL, S. Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, v. 105, p. 130–137, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>. Acesso em: 24 out. 2023.
- KARAGULIAN, F.; BELIS, C.; DORA, C. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, v. 120, p. 475–483, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>. Acesso em: 22 set. 2023.
- KARAGULIAN, F.; BARBIERE, M.; KOTSEV, A.; SPINELLE, L.; GERBOLES, M.; LAGLER, F.; REDON, N.; CRUNAIRE, S.; BOROWIAK, A. Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere*, v. 10, p. 506, out. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/9/506>. Acesso em: 30 set. 2023.
- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452 p.
- KROTKOV, N. A.; LAMSAL, L. N.; MARCHENKO, S. V.; CELARIER, E. A.; BUCSELA, E. J.; SWARTZ, W. H.; JOINER, J.; AND THE OMI CORE TEAM. OMI/Aura NO<sub>2</sub> Cloud-Screened Total and Tropospheric Column L3 Global Gridded 0.25 degree x 0.25 degree V3. NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019. Disponível em: <[10.5067/Aura/OMI/DATA3007](https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3007)>. Acesso em: jun. 2021.
- KLUMPP, A.; ANSEL, W.; KLUMPP, G.; FOMIN, A. Um novo conceito de monitoramento e comunicação ambiental: a rede europeia para avaliação da qualidade do ar usando plantas bioindicadoras (EuroBionet). *Revista Brasileira de Botânica*, v. 24, n. 511, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbb/v24n4s0/9472.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- KUNDU, P.; GILL, R.; NEHRA, A.; KRISHAN, K. S.; HASANUZZAMAN, M.; PRASAD, R.; TUTEJA, N.; SARVAJEET, S. G. Reactive oxygen species (ROS) management in engineered plants for abiotic stress tolerance. In: *Advancement in Crop Improvement Techniques*, 2020, p. 241–262. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128185810000152>. Acesso em: 30 nov. 2022.
- KRINSKY, N. I. The biological properties of carotenoids. *Pure and Applied Chemistry*, v. 66, p. 1003–1010, 1994.
- KLING, M.; ACKERLY, D. D.; TAYLOR, J. W. Seasonal variations in atmospheric pollutants and their effects on plant health. *Atmospheric Environment*, v. 171, p. 60–69, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.024>.
- LARCHER, W. *Physiological Plant Ecology*. Springer-Verlag, 2003. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-05214-3>>. Acesso em: 30 nov. 2022.
- LEANDRO, D. S.; LESSA, D.; SILVA, R. A.; MENDES, S. O.; DUARTE, T. E. P. N. Estudos para uso de organismos potencialmente bioindicadores e biomonitoras.

- Biodiversidade, v. 17, n. 2, p. 115–130, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/biodiversidade/issue/view/457>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- LELIEVELD, J., KLINGMÜLLER, K., POZZER, A., PÖSCHL, U., FNAIS, M., DAIBER, A., MÜNZEL, T. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *Eur Heart J.*, v. 40, n. 20, p. 1590-1596, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30860255/>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- LIMA, J. S. et. al. Programa de biomonitoramento da qualidade do ar da cidade do Salvador proposta e resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e ambiental. Campo Grande: ABES, 2005. Disponível em: <<http://www.laviet.ufb.br>>. Acesso em: 23 fev. 2019.
- MAKI, E. S. et al. Utilização de bioindicadores em monitoramento de poluição. *Biota Amazônia*, v. 3, n. 2, p. 169-178, 2013. Disponível em: <<https://periodicos.unifap.br/index.php/biota/article/view/705>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- MAIOLI, O. L. G.; SANTOS, J. M.; REIS JÚNIOR, N. C.; CASSINI, S. T. A. Parâmetros bioquímicos foliares das espécies *\*Licania tomentosa\** (Benth.) e *\*Bauhinia forficata\** (Link.) para avaliação da qualidade do ar. *\*Química Nova\**, v. 31, n. 8, p. 1925-1932, nov. 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/scqwhPxtchVhFvcQyKNtQsQ/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- MAGI, B. I.; CUPINI, C.; FRANCIS, J.; GREEN, M.; HAUSER, C. Evaluation of PM2.5 measured in an urban setting using a low-cost optical particle counter and a Federal Equivalent Method Beta Attenuation Monitor. *\*Aerosol Science and Technology\**, v. 54, n. 2, p. 147–159, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1619915>>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- MASIOL, M.; AGOSTINELLI, C.; FORMENTON, G.; TARABOTTI, E.; PAVONI, B. Thirteen years of air pollution hourly monitoring in a large city: Potential sources, trends, cycles and effects of car-free days. *Science of the Total Environment*, v. 494-495, p. 84-96, out. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.122>>. Acesso em: 30 set. 2023.
- MARTIN, E.; POSTIGLIONE, E. A.; MUDAY, G. K. Reactive oxygen species function as signaling molecules in controlling plant development and hormonal responses. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 69, out. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369526622001224>>. Acesso em: 30 nov. 2022.
- MARKANDANA, S.; ABDULLAH, B. A.; MUSAB, K. H.; SUBRAMANIAM, V.; STOCKHAM, K. Determination of Antioxidant Activities, Total Phenolic and Flavonoid Contents in *Bougainvillea glabra* Bracts at Various Methanol Concentrations. *\*AIP Conference Proceedings*, v. 1784, n. 030038, p. 1-6, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4966776>>. Acesso em: 26 jul. 2023.

- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivos de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 18 jul 2023.
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE - OPAS. Novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS visam salvar milhões de vidas da poluição atmosférica. 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 em: 23 mai 2022.
- OLIVEIRA, M. F. et al. Folhas como bioindicadores da qualidade do ar: estudo da absorção de poluentes atmosféricos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 56, n. 2, p. 112-123, 2021.
- ORTIZ, G., et. al. Chapter One - Oxidative Stress: Love and Hate History in Central Nervous System. In *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*. 2017, v108, p.1-31. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1876162317300032>> Acesso em 23 abr. 2023
- PEICHL, L. 1997. Landesweite Erhebung von Immissionswirkungen mit Bioindikatoren. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 9:273-282.
- PEREZ-LOPEZ, J.; GANDULLO, J.; DE LA OSA, C.; FERIA, A.B; ECHEVARRÍA, C.; MONREAL, J.A; GARCÍA-MAURINO, S. Responses to aluminum and cadmium of a RNAi sorghum line with decreased levels of phosphoenolpyruvate carboxylase 3 (PPC3). In: *Environmental and Experimental Botany*, v. 205, p.1-15 January, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847222003616?via%3Dihub>>. Acesso em 23 abr 2023.
- PIAZZETTA, K.D; RAMSDORF, W.A; MARANHO, L.T. Use of airplant *Tillandsia recurvata* L., Bromeliaceae, as biomonitor of urban air pollution. In: *Aerobiologia*, v. 35, p.125-137, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10453-018-9545-3>> Acesso em 15 dez. 2022.
- POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. In: *Estudos avançados*, São Paulo, v. 31, n. 89, p. 271-283, 2017. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142017000100271&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142017000100271&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 03 mar 2021.
- PRESTES, R.M; VINCENCI, K.L. Bioindicadores como avaliação de impacto ambiental. In: *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, Curitiba, v. 2, n. 4, p. 1473-1493, jul./set. 2019. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJAER/article/view/3258/3128>>. Acesso em 11 jun. 2021.
- PANG, J., ZHANG, S., ZHENG, H., & LI, J. (2020). Impacts of temperature and air pollutants on plants. *Environmental and Experimental Botany*, 176, 104087. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104087>.
- RAO, X., ZHONG, J., BROOK, R.D., RAJAGOPALAN, R.S. Effect of Particulate Matter Air Pollution on Cardiovascular Oxidative Stress Pathways. In: *Antioxidants &*

Redox Signaling, v. 28, n 9, p. 797–818. 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.1089/ars.2017.7394>> Acesso em 23 jan. 2023

ROUPSARD, P., AMIELH, M., MARO, D., COPPALLE, A., BRANGER, H., CONNAN, O., LAGUIONIE, P., HÉBERT, D., TALBAUT, M. Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces. *Journal of Aerosol Science*, v.55, p.12-24,2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2012.07.006>. Acesso em 24 out 2023.

ROTH, G.A., et. al. Global Burden of Cardiovascular Diseases Writing Group. Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk Factors, 1990-2019: Update From the GBD 2019 Study. *J Am Coll Cardiol*. 2020 Dec 22; v. 76, n. 25, p. 2982-3021. doi: 10.1016/j.jacc.2020.11.010. Erratum in: *J Am Coll Cardiol*. 2021 Apr 20; 77(15):1958-1959. doi: 10.1016/j.jacc.2021.02.039. PMID: 33309175; PMCID: PMC7755038. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33309175/>. Acesso em: 03 mar. 2025.

RODRIGUES, B.R., SORIANO, H.C., MONTENEGRO, J.S. Uso de Bioindicadores Vegetais no Monitoramento da Qualidade do Ar no Município de Camaçari – BA. In: Revista Internacional de Ciências. Rio de Janeiro, v. 10, n. 01, p. 73 - 90, abr, 2020. Disponível em: <<http://www.epublicacoes.uerj.br/ojs/index.php/ric>> Acesso em 19 dez. 2022.

SALA, H., R.O papel de fungos micorrízicos arbusculares na tolerância do feijão comum ao crômio. 61 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste. Presidente Prudente, São Paulo, p.61. 2022. Disponível em: <http://bdtd.unoeste.br:8080/tede/bitstream/jspui/1517/5/H%c3%89LIDA%20SALA.pdf>

]SALEEM,H., HTAR,T.T., NAIDU, R., ZENGİN,G. AHMAD, I.,NAFEES, A. Phytochemical profiling, antioxidant, enzyme inhibition and cytotoxic potential of Bougainvillea glabra flowers. In: Natural Product Research, 34:18, p.2602-2606, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1543684>. Acesso em 23 jun.2023.

SALLAM, N.; ERAKY, A. M.;SALLAM, A. Effect of Trichodermaspp. on Fusariumwilt disease of tomato. Molecular biology reports, v. 46, p. 4463-4470, 2019. SAN MARTIN, M. C.; SAN MARTIN, M. C. Condições atuais das emissões dos poluentes atmosféricos durante a quarentena da COVID-19 e as perspectivas futuras. In: Boletim de Conjuntura (BOCA), Boa Vista, v. 2, n. 5, p. 85-96, apr. 2020. ISSN 2675-1488. Disponível em: <<https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/130>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

SANTOS, U. de P. et al. Poluição do ar ambiental: efeitos respiratórios. In: Jornal brasileiro pneumol., São Paulo, v. 47, n. 1, e20200267, 2021. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S180637132021000100501&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180637132021000100501&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 14 abr. 2021.

- SHANKAR, K., MEHENDALE, H.M. Oxidative stress. In Encyclopedia of Toxicology (Third Edition). 2014. p. 735-737. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123864543003456>>. Acesso em 23 abr. 2023
- SECREST, M.H., SCHAUER, J.J., CARTER, E.M., BAUMGARTNER, J. Particulate matter chemical component concentrations and sources in settings of household solid fuel use. *Indoor Air*, 2017; 27: 1052–1066. doi: 10.1111/ina.12389.
- SIES, H. Chapter 13 - Oxidative Stress: Eustress and Distress in Redox Homeostasis. In Stress: Physiology, Biochemistry, and Pathology. Handbook of Stress Series, v.3, p. 153-163, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128131466/stress-physiology-biochemistry-and-pathology>>. Acesso em 23 abr. 2023.
- SOUSA, F. das C.A.; et. al. In vitro antioxidant activity of *Lippia organoides* H.B.K. Research, Society and Development, [S.I.], v. 10, n. 8, p. e2810816716, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i8.16716. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/16716>. Acesso em: 30 mar. 2025.
- SONI, H., & SEHRAWAT, S. (2019). Phytopharmacology Profile of *Bougainvillea glabra*: An Overview. *British Journal of Medical and Health Research*, 6(5), 29–38. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/343549472>. Acesso em 26 jun. 2023
- SULEIMAN, M. K., BHAT, N. R. ,2003. Performance of Ornamental Plants in Bioremediated Soil. In : Bioremediated Soil, Arid Land Research and Management, v.17, n 2, p.169-176. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15324980301587>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008. 820
- CHOI, Y.S.; HO, C.H.; CHEN, D.; NOH, Y.H.; SONG, C.K. Spectral analysis of weekly variation in PM10 mass concentration and meteorological conditions over China. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 4, p. 655-666, 2008.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Terms of Environment: Glossary, abbreviations and acronyms. 1992. Disponível em: <<https://www.epa.gov/>>. Acesso em 15 mai 2022.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Introduction to Indoor Air Quality. 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality#causes>. Acesso em 15 fev 2025.
- VALLERO, D.A. Fundaments of Air Pollution. 4. ed., São Paulo: Elsevier, 2008.
- JVASCONCELOS, N. V. de; ABREU, R. M. de. Situação do controle da poluição em Cubatão. *Revista Ambiente*, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 128–131, 1987. Disponível em: <https://revista.cetesb.sp.gov.br/revista/article/view/34>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- VELIKOVA, V., YORDANOV,I., EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. Protective role of exogenous polyamines. In: *Plant Science*, v. 151, p. 59–66, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168945299001971>. Acesso em 21 jan. 2022.

VELLOSA, J.C.R., BIAVATTI, M., FRANÇOIA, P.C.O., DE MELLO, B.J., DE ALMEIDA, A.C., & BUENO, G.E. Estresse oxidativo: uma introdução ao estado da arte / Oxidative stress: an introduction to the state of art. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 10152–10168, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-688>. Acesso em 21 jan. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Air quality and health. 2023. Disponível em: <<https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>>. Acesso em: 25 jan 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Air pollution. 2023. Disponível em: [https://www.who.int/HEALTH-TOPICS/AIR-POLLUTION#tab=tab\\_1](https://www.who.int/HEALTH-TOPICS/AIR-POLLUTION#tab=tab_1). Acesso em: 01 mai 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Expert Committee on Environmental Sanitation & World Health Organization. (1958). Air pollution: fifth report of the Expert Committee on Environmental Sanitation [meeting held in Geneva from 18 to 23 November 1957]. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/40416> Acesso em 15 abr 2021

YASIN, N.A., W.U. KHAN, S.R. AHMAD, A. ALI, S. AHMED, A. AHMAD, 2018. Effect of *Bacillus* *fortis* 162 on growth, oxidative stress tolerance and phytoremediation potential of *Catharanthus roseus* under chromium stress. In: International Journal of Agriculture & Biology, v. 20, n 7, p.1513–1522, 2018. Disponível em: [http://www.fspublishers.org/published\\_papers/30271\\_.pdf](http://www.fspublishers.org/published_papers/30271_.pdf). Acesso em: 17 jun. 2021.

ZHENG,T., ZHANG,S., LI,X.B., WU,Y., JIA, Y., WU,C.L., HE,H.D., PENG,Z.R. Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments. Environmental Pollution, v.282, n.117067, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121006497>. Acesso em 20 jul 2023