



Alterações foliares em *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) decorrentes do acúmulo de particulados atmosféricos em área de mineração no sul do Brasil

Costa, Voigt Fábio¹; Schaidhauer, Ana Carenina Gheller²; Melo Jr., João Carlos Ferreira^{1,2}

¹Departamento de Ciências Biológicas, Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE) – Rua Paulo Maschitzki, 10, CEP 89219-710, Joinville, SC, Brasil. ²Programa de Pós-Graduação em Saúde e Meio Ambiente, Laboratório de Morfologia e Ecologia Vegetal, joao.melo@univille.br

Artigo recebido em 09/05/2023 e aceito em 25/08/2023

RESUMO

A poluição atmosférica, decorrente da atividade antrópica, é um fator que provoca alterações funcionais nas populações de plantas em todo o mundo. Mudanças essas que podem ser mensuradas e os resultados, assim obtidos, usados como bioindicadores da qualidade ambiental. Este estudo objetivou avaliar os efeitos do acúmulo de material particulado (MP) atmosférico, proveniente da atividade de lavra de rocha por uma mineradora em Joinville/SC, sobre a espécie nativa *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae). Foram selecionados 5 indivíduos, para a avaliação de atributos morfoanatômicos e fisiológicos foliares, em dois pontos amostrais, sendo um adjacente à fonte emissora (ponto poluído) e outro em um ponto controle. O MP foi removido mecanicamente da superfície foliar e preparado para análise química por meio de difração de raio X e registro da superfície foliar em MEV. A quantificação e especiação do MP foi realizada por meio da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma (ICP-OES). Médias foram comparadas por meio de Teste t e a contribuição do atributo avaliada pela Análise de Componentes Principais, ambos em ambiente R. A maior quantidade de Silício, Ferro, Zinco, Magnésio, Alumínio e Manganês foi registrada no ponto poluído e que parece ter a sua origem nas rochas quartzosas lavradas e britadas. Foram observadas diferenças interpopulacionais para todos os atributos foliares avaliados, com destaque à deficiência de clorofilas a e b nas plantas da área poluída, sugerindo que a poluição por MP afeta o crescimento da espécie estudada. A vantagem do uso de bioindicadores está em seu baixo custo e na eficiência de avaliação da qualidade ambiental.

Palavras-chave: fotossíntese, poluição atmosférica, material particulado, biomonitoramento, qualidade do ar.

Leaf alterations in *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) due to the accumulation of atmospheric particulates in a mining area in southern Brazil

ABSTRACT

Atmospheric pollution, resulting from human activity, is a factor that causes functional changes in plant populations worldwide. These changes can be measured, and the results thus obtained, used as bioindicators of environmental quality. This study aimed to evaluate the effects of atmospheric particulate matter (PM) accumulation, resulting from rock mining activity by a mining company in Joinville/SC, on the native species *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae). Five individuals were selected for the evaluation of leaf morphoanatomical and physiological attributes, in two sampling points, one adjacent to the emitting source (polluted point) and the other in a control point. The PM was mechanically removed from the leaf surface and prepared for chemical analysis by means of X-ray diffraction and recording of the leaf surface in SEM. The quantification and speciation of the PM was performed using Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Means were compared using the t-Test and the contribution of the attribute assessed by Principal Component Analysis, both in an R environment. Greater amounts of Silicon, Iron, Zinc, Magnesium, Aluminum and Manganese were recorded at the polluted point and that seems to have its origin in the quarried and crushed quartz rocks. Interpopulational differences were observed for all foliar attributes evaluated, with emphasis on chlorophyll a and b deficiency in plants from the polluted area, suggesting that PM pollution affects the growth of the studied species. The advantage of using bioindicators is their low cost and efficient assessment of environmental quality.

Key words: photosynthesis, atmospheric pollution, particulate matter, biomonitoring, air quality.

Introdução

A poluição atmosférica, intensificada nos últimos anos pelo crescimento urbano e desenvolvimento industrial, é extremamente prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana, tornando-se importante o monitoramento da qualidade do ar para mensurar as concentrações dos poluentes atmosféricos e construir um histórico de dados, auxiliando na tomada de decisões e no planejamento de ações e políticas públicas para garantir a qualidade do ar. (Vormittag et al., 2021). A poluição do ar é um dos principais problemas nas áreas urbanas (WHO, 2021). Poluente atmosférico é definido como uma substância adicionada à atmosfera passível de causar efeito mensurável nos seres vivos e em materiais (CETESB, 2021). A poluição atmosférica moderna é um complexo coquetel de gases e material particulado (MP), os quais se destacam os óxidos de nitrogênio, ozônio e partículas excepcionalmente pequenas de matéria (kelly et al., 2015). A Agência Nacional de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 2023) define que as partículas inaláveis (MP10) são aquelas com diâmetros iguais ou menores do que 10 micrômetros, as partículas finas inaláveis (MP2.5) com diâmetros menores ou iguais a 2.5 micrômetros, enquanto as partículas totais em suspensão (PTS), abrangem as partículas de tamanho variando entre 0,1 µm até cerca de 30 µm, englobando as frações MP10 e MP2.5 (U.S. EPA, 2023).

Os riscos à saúde associados a partículas de diâmetro igual ou menor que 10 e 2,5 µm, MP₁₀ e MP_{2,5}, respectivamente, são de particular relevância para a saúde pública; tanto as MP_{2,5} quanto as MP₁₀ são capazes de penetrar profundamente nos pulmões, mas as MP_{2,5} podem entrar até mesmo na corrente sanguínea, resultando principalmente em impactos cardiovasculares e respiratórios e afetando outros órgãos. (NAÇÕES UNIDAS, 2021). Durante o processo de mineração, a rocha precisa ser quebrada, peneirada e beneficiada, de modo que ocorre a liberação de diferentes tamanhos de MP no ar (Huang et al., 2019).

A poluição atmosférica põe em perigo a saúde do planeta, destrói os ecossistemas e está intimamente ligada à mudança climática global (IPCC, 2021). O cenário atual de elevada pressão antrópica sobre o meio ambiente, culmina na

necessidade da realização de monitoramento de índices de poluição ambiental com a utilização de técnicas eficientes e de fácil aplicabilidade (Santos et al., 2021).

A Resolução do CONAMA nº3 de 28/06/1990 define como poluente atmosférico “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora, prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade” (CONAMA, 1990). O material particulado não é uma substância única, e sim constituída por partículas de diversos poluentes (Santos, 2017). Características foliares, como textura ou rugosidade superficial, hidrofobicidade e presença de revestimento ceroso, podem determinar quanto material particulado aderirá às superfícies foliares após ser interceptado de correntes de vento (Corada et al., 2021). Os resíduos depositados nas folhas, podem originar um verdadeiro filme impermeável sobre a sua superfície prejudicando todos os processos que envolvam trocas gasosas (CETESB, 2022). O impacto das partículas nas plantas acarreta que as partículas passem para a estrutura das mesmas (Miller, 2007).

Maiores níveis de poluição estão associados à menor espessura do limbo e do mesófilo (Melo Júnior et al., 2014), assim como menor desenvolvimento foliar (massa fresca e área foliar) e menor capacidade fotossintetizante (Santos et al., 2019). O biomonitoramento tem se apresentado como uma estratégia confiável para detectar os efeitos da poluição atmosféricas sobre organismos sésseis, como líquens ou plantas, e que estão continuamente expostos aos condicionantes ambientais (Haveric et al., 2022).

Com base nesse contexto, nós hipotetizamos que a emissão de material particulado resultante da atividade de mineração de rochas em Joinville (SC) desempenha um papel fundamental na indução de mudanças tanto morfológicas quanto fisiológicas nas plantas da região. Especificamente, este estudo tem como objetivo detectar essas alterações em folhas da espécie *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) em

áreas de mineração de rocha quartzosa. Essas investigações são cruciais para compreender e mitigar os impactos da poluição atmosférica na

vegetação e, consequentemente, na saúde do ecossistema local.

Material e métodos

A cidade de Joinville, situada no estado de Santa Catarina, possui uma área de 1.127,947km², população estimada de 604.708 pessoas e PIB *per capita* de R\$58.476,90 (IBGE, 2021). O clima da região é do tipo úmido a superúmido, mesotérmico, com curtos períodos de estiagem, e apresenta três subclasses de microclima diferentes, devido às características do relevo. Segundo a classificação de Thornthwaite, as três subclasses da região são: AB'4 ra' (superúmido) na planície costeira; B4 B'3 ra' (úmido) nas regiões mais altas; e B3 B'1 ra' (úmido) no planalto ocidental. A umidade relativa média anual do ar é de 76,04%. O relevo do município se desenvolve sobre terrenos cristalinos da Serra do Mar e numa área de sedimentação costeira. Na região de transição entre o Planalto Ocidental e as Planícies Costeiras, encontram-se as escarpas da serra, com vertentes inclinadas (mais de 50°) e vales profundos e encaixados. A parte oeste do território do município estende-se até os contrafortes da Serra do Mar. Dentre os ecossistemas que ocorrem na região destacam-se, com mais de 60% de cobertura, a Floresta Ombrófila Densa (cerca de 680 km²) e seus ecossistemas associados, destacando-se os Manguezais, com 36 km² (JOINVILLE CIDADE EM DADOS, 2019).

Para monitorar e analisar a espécie selecionada, foram definidos dois pontos amostrais (Figura 1):

- Ponto Poluído (PP, 26°14'39.02.81'', 48°55'34.09''): área vegetada, distante 1,2km da mineração de rocha quartzosa a céu aberto; altitude de 60 metros acima do nível do mar; sem obstáculos naturais entre a fonte poluidora e o PP; possui intenso tráfego de caminhões procedentes da área de mineração.
- Ponto Controle (PC, 26°13'38.33'', 48°55'31.91''): área vegetada, distante 1,7 km da mineração de rocha quartzosa a céu aberto; altitude de 75 metros acima do nível do mar; cercada por morros de 130 a 280 metros de altitude cobertos por mata nativa (Floresta Ombrófila Densa) bem preservada.

A fonte de mineração de rocha quartzosa se localiza na face leste de uma montanha (Figura1), e a lavra abrange a cota que vai de 215 até 385 metros de altitude.

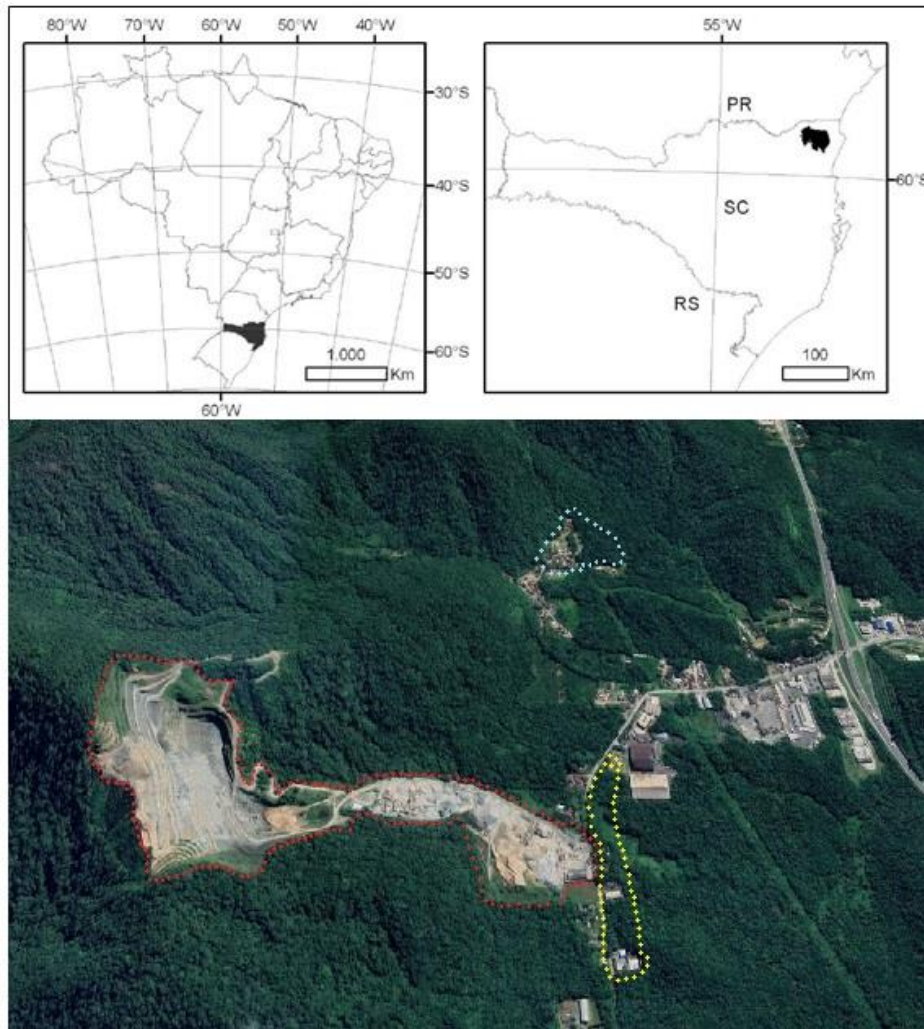


Figura 1. Localização dos pontos amostrais para o monitoramento de *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) no município de Joinville, Santa Catarina, Brasil. Legenda: área de mineração (pontilhado vermelho); área poluída (pontilhado amarelo); área controle (pontilhado azul).

Espécie biomonitora

Piperaceae é uma família majoritariamente tropical que inclui de cinco a oito gêneros e aproximadamente 2000 espécies (Souza & Lorenzi, 2012). No Brasil ocorrem 3 gêneros e aproximadamente 450 espécies, dentre os quais o gênero *Piper*, o qual possui cerca de 340 espécies (Yunker, 1973). A espécie *Piper gaudichaudianum* Kunth é conhecida popularmente por aperta-ruão, erva-de-São-Manuel ou jaborandi (SiBBR, 2020). Sua distribuição geográfica abrange o Norte (Pará), Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco), Centro-Oeste (Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso), Sudeste (Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo), Sul (Paraná, Rio Grande do Sul, Santa

Catarina), nos domínios fitogeográficos Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica. É um arbusto moderado a denso pubescente, os tricomas são variáveis acima de 1 mm ou mais longos, mas também podem ser mais curtos, eretos ou não muito frequente direcionados para cima lâmina foliar assimétrica com o lado mais curto agudo e o lado mais longo arredondado, obtuso a subcordado ou ocasionalmente agudo; face adaxial hispido-escabra, face abaxial subvilosa, glândulas presentes; inflorescência do tipo espiga; fruto glabro (REFLORA, 2020).

Coleta de material botânico e atributos selecionados

Em cada ponto amostral foram selecionados 5 indivíduos de *P. gaudichaudianum*, totalizando 10 indivíduos amostrais em fase adulta de desenvolvimento na mesma fenofase. As coletas foram efetuadas na mesma estação do ano e na fase adulta das plantas para evitar o viés da sazonalidade sobre a ontogenia foliar. De cada indivíduo foram coletadas 30 folhas de cada indivíduo (N=150), ambas completamente expandidas, e sem lesões provocadas por herbívoros. A escolha dos atributos funcionais foi baseada em Pérez-Harguindeguy *et al.* (2013), adotando-se: massa fresca (g), massa seca (g), obtidos com auxílio de balança analítica de precisão; área foliar (cm²) mensurada por meio do software Sigma Scan Pro 5.0; espessura foliar (mm) obtida por meio de paquímetro digital; e teor de clorofila.

A quantificação de pigmento fotossintetizante foi realizada através da medição dos teores de clorofila a e b em 15 folíolos por indivíduo (N=75). Para tanto, primeiro, foram macerados manualmente 0,5 gramas do terço médio do folíolo apical da folha de cada indivíduo amostral. Essa maceração foi realizada com a adição de 5 ml de acetona 80%. O conteúdo resultante foi então transferido para tubos de centrifugação, que foram previamente revestidos com papel alumínio contato com a luz. Os tubos foram centrifugados por 10 minutos a uma velocidade de 2000 RPM, utilizando uma centrífuga Sigma 3K12. Após a centrifugação, 0,5 ml do sobrenadante foi diluído em 5 ml de acetona 80% e transferido para cubetas. As leituras das amostras foram realizadas em espectrofotômetro Biospectro SP22, com comprimentos de onda de 645 nm e 663 nm, que permitiu estimar os teores de clorofilas a e b, respectivamente (Linder, 1974). A clorofila a foi calculada utilizando a seguinte equação: $(12,7 \times A_{663} - 2,69 \times A_{645}) \times 1,119$, enquanto a clorofila b foi calculada da seguinte maneira: $(22,9 \times A_{645} - 4,68 \times A_{663}) \times 1,102$. A clorofila total, que é a soma de clorofila a e b, foi obtida simplesmente somando os valores calculados para ambas as clorofilas (Hendry & Grime, 1993).

Dessa forma, obtive-se informações precisas sobre os teores de clorofila a e b nas amostras analisadas, permitindo-nos realizar uma avaliação confiável dos resultados.

Coleta e análise de material particulado

Para realizar a caracterização do material particulado (MP), foram empregadas 15 folhas de cada indivíduo provenientes do PP e PC (totalizando N=75). Para assegurar a remoção integral das partículas depositadas na superfície das folhas, procedeu-se à limpeza utilizando um pincel de cerdas finas. A avaliação visual do MP depositadas sobre as folhas foi conduzida através do emprego de microscopia eletrônica de varredura JEOL JSM 670F (MEV). A superfície adaxial da epiderme foliar foi examinada e documentada por meio de microfotografia.

A quantificação e identificação do MP foram conduzidas utilizando a técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma (ICP-OES). Para isso, adicionou-se 0,5 ml de ácido nítrico (HNO₃) e 0,25 ml de ácido clorídrico (HCl) a uma solução aquosa de 25 ml contendo MP de cada ponto amostral. A solução resultante foi aquecida a 100°C em uma placa de aquecimento até que seu volume se reduzisse a 10 ml, um processo conhecido como abertura da amostra. Finalmente, a solução foi diluída a 25 ml com água Milli-Q, e a análise dos metais foi realizada utilizando o equipamento mencionado.

Análise estatística

As médias e seus respectivos desvios-padrão foram calculados para todos os atributos biológicos e variáveis ambientais quantitativas consideradas. A comparação das médias foi conduzida utilizando teste t, com um valor de $p \leq 0,05$, garantindo assim um rigoroso critério de significância estatística. Além disso, uma análise de componentes principais foi realizada com o objetivo de identificar qual atributo contribuiu de forma mais substancial para a explicação da variação observada no conjunto de dados. Os testes foram realizados em ambiente R (Boccard *et al.*, 2011).

Resultados

A concentração de material particulado observado nas folhas de *P. gaudichaudianum* foi maior em PP quando comparado ao PC. Foram identificados, por meio do ICP-OES, diferentes elementos químicos contidos no MP, sendo maior a concentração e variedade obtidas no PP, com destaque ao silício e ao ferro. No ponto controle foi evidenciada fração mínima de silício e ausência de metais pesados. (Figura 2). Através da microscopia

2998

eletrônica de varredura foram observadas partículas sólidas (MP) de diferentes tamanhos aderidas à superfície adaxial da epiderme foliar da espécie usada como biomonitora, sendo evidente a deposição de MP no ponto poluído (Figura 3). Os atributos morfológicos e fisiológicos medidos em *P. gaudichaudianum* mostraram diferenças significativas entre as populações dos pontos poluídos e controle (Tabela 1). O PP apresentou menores valores de área foliar, massas fresca e seca e teores de clorofila. A espessura foliar foi o único atributo que apresentou maior valor no PP em comparação ao PC. Em contrapartida, a variação observada nos atributos foliares no PC foi,

em média, igual ou superior a 100% do registrado no PP, com destaque a área foliar (98,02%), teor de clorofila a (98,26%), teor de clorofila b (97,56%) e clorofila total (102%). A análise de componentes principais (PCA) mostrou, para os atributos da espécie de planta monitora, que os dois primeiros componentes explicaram juntos 74,13% da variância total dos dados. Os teores de clorofila A, clorofila B e clorofila total foram mais relacionados ao eixo principal 1, que explicou 58,44% da variância. Já o eixo principal 2 explicou 15,68% da variância e esteve mais relacionado aos atributos de massa fresca e seca foliar (Figura 4)

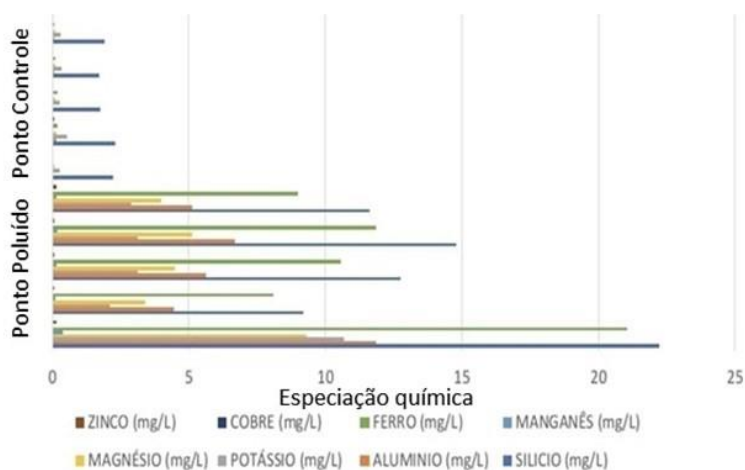


Figura 2. Especiação química obtida por espectrometria de massa do material particulado presente na superfície adaxial foliar de *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) nos pontos poluído e controle.

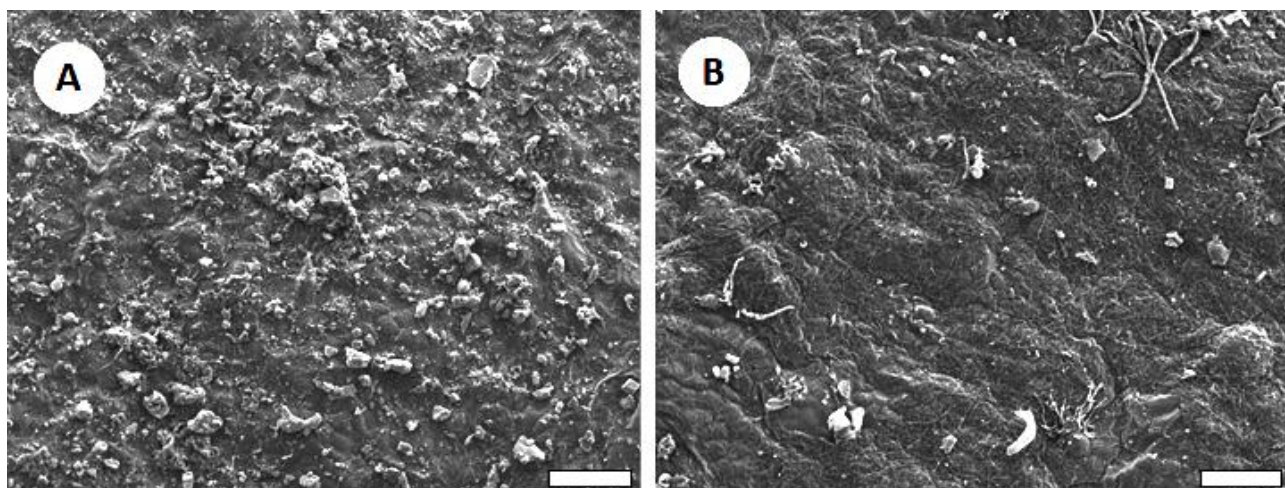


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura da superfície adaxial foliar de *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae). Legenda: (A) Ponto Poluído; (B) Ponto Controle. Barra de escala = 100µm.

Tabela 1. Médias, desvios-padrão e escores da análise de componentes principais dos atributos morfológicos e fisiológicos das populações de *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) nos pontos poluído e controle. Letras distintas na mesma linha indicam diferença estatística ao nível de 0,05.

Atributo	Ponto Poluído	Ponto Controle	PCA	
			Comp. 1	Comp. 2
Massa fresca (g)	0.50 ± (0,17) b	0.85 ± (0,30) a	0.39	0.41
Massa seca (g)	0.17 ± (0,06) b	0.22 ± (0,08) a	0.41	0.29
Área foliar (cm ²)	20.24 ± (7,80) b	40.02 ± (13,77) a	0.44	0.39
Espessura foliar (cm)	0.11 ± (0,02) a	0.08 ± (0,03) b	0.38	0.54
Clorofila a (mgL ⁻¹)	3.94 ± (3,10) b	7.03 ± (4,51) a	0.36	0.49
Clorofila b (mgL ⁻¹)	2.16 ± (2,22) b	5.2 ± (2,97) a	0.36	0.20
Clorofila total (mgL ⁻¹)	6.10 ± (4,69) b	12.23 ± (6,70) a	0.25	0.00
Proporção de variância			0.5844	0.1568
Proporção cumulativa			0.5844	0.7413

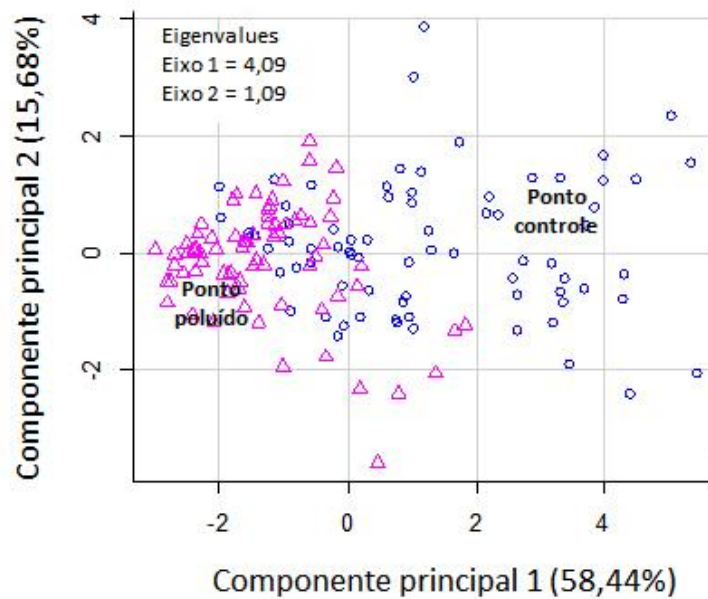


Figura 4. Análise de componentes principais com atributos foliares de *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) nos pontos poluído e controle.

Discussão

Uma concentração significativamente mais elevada de material particulado foi observada na superfície foliar de *P. gaudichaudianum* na população amostral do Ponto Poluído, em comparação com o Ponto Controle. A elevada concentração de material particulado presente na atmosfera do Ponto Poluído indica uma intensa atividade mineradora e um tráfego intenso de veículos pesados que constantemente levantam partículas depositadas na via e as devolvem ao ar, bem como pela provável falta de medidas preventivas por parte da fonte emissora de poluentes. O estudo realizado por Heerd e Melo Júnior (2022) no município de Joinville, que envolveu a espécie *Handroanthus chrysotrichus* (Bignoniaceae) e adotou uma abordagem metodológica semelhante, revelou uma concentração significativamente maior de material particulado e outros poluentes em um ponto próximo às potenciais fontes emissoras. Esta descoberta pode, em parte, talvez explicar o elevado valor de material particulado observado no ponto poluído. Esse local está situado adjacente a uma via de tráfego intensivo de caminhões que servem a uma mineradora próxima. Em outro estudo conduzido por Cavallaro et al. (2018) na cidade de Joinville, identificou-se uma significativa elevação na concentração de material particulado nas áreas próximas a possíveis fontes emissoras. O estudo foi realizado com a espécie *Inga edulis* da família Fabaceae. Conforme Inoue e Reissmann (1991), ao observarem a concentração de poluentes em *Ligustrum lucidum* (Oleaceae), estes se mostraram mais elevados no local de tráfego intenso de veículos em comparação com um bosque localizado nos arredores da cidade.

A concentração de material particulado transportado pelo ar nas folhas do dossel urbano pode variar com sua elevação acima do solo, pois a elevação controla a velocidade do vento e, portanto, a concentração de material particulado transportado pelo ar (Jamie et al., 2023). De acordo com um estudo que utilizou a tipuana (*Tipuana tipu*, Fabaceae), uma das espécies arbóreas mais prevalentes em São Paulo, demonstrou-se que a presença de poluentes atmosféricos limita o crescimento dessas árvores, impactando adversamente os serviços ecossistêmicos que elas proporcionam. Entre esses

serviços estão filtrar a poluição do ar ao acumular metais em suas cascas e no tronco, assimilar dióxido de carbono, reduzir o efeito de ilha de calor, ao atenuar a radiação solar, e mitigar o escoamento da água da chuva, controlando a umidade (Locosselli et al., 2019).

Os valores médios dos parâmetros morfológicos do Ponto Poluído se diferenciam em relação aos do Ponto Controle com relação ao investimento feito pela planta (Tabela 1), a área foliar se mostrou significativamente menor no PP em comparação ao do PC, o que se refletiu numa menor massa fresca e seca, apesar da maior espessura das folhas do PP. A diferença significativa na área foliar entre as duas áreas amostradas pode ser parcialmente atribuída à reduzida produção fotossintética devido à deposição de material particulado, que obstrui a luz solar, indicando uma limitação na alocação de recursos pela planta. Por conseguinte, a limitação do gás carbônico, essencial na produção de carboidratos, compromete o desenvolvimento da planta (Braga et al., 2021).

As diferenças morfológicas foliares constatadas nos resultados, condizem também com estudo utilizando a espécie pioneira arbórea *Cordia superba* (Boraginaceae), o qual mostrou que essa espécie possui a capacidade de desenvolver diferentes fenótipos em resposta a disponibilidades de luz contrastantes (Souza et al., 2008). As folhas de sol alcançam uma alta taxa fotossintética máxima, produzindo folhas mais espessas com menor área foliar, devido à formação de grandes células paliçádicas e/ou um aumento no número de camadas dessas células. Ao contrário, as folhas que se encontram na sombra possuem um peso específico mais baixo e uma área foliar maior (Lambers et al., 1997). Estudos similares feitos com *Tibouchina granulosa* (Melastomataceae) e *Inga edulis* apresentaram área foliar específica menor nas populações das áreas poluídas, aumentando em direção às áreas controle. Este resultado sugere maior investimento na permanência do órgão foliar nas áreas poluídas e maior produção fotossintética nas áreas controle (Melo Júnior et al., 2014; Cavallaro et al., 2018).

Segundo Heerd e Melo Júnior (2022), a redução na produtividade da parte aérea deve ser compensada por alguma outra estratégia funcional nas plantas que habitam as áreas poluídas. Logo, a área foliar específica é um importante indicador

ecológico para a avaliação do desenvolvimento vegetal, pois responde a diferentes fatores ambientais.

O baixo investimento na produção fotossintética no Ponto Poluído pode estar relacionado a um processo de deterioração dos tecidos fotossintetizantes e, conseqüentemente, à fotoinibição subsequente. Os valores médios menores de produção de clorofila a e b, bem como de clorofila total, na população do Ponto Poluído, refletem de forma evidente esses prejuízos fisiológicos causados pela deposição abundante de material particulado na superfície superior das folhas. Essa situação, por sua vez, tende a resultar em danos morfológicos secundários.

De modo geral, os autores sugerem que o prejuízo eventual que os particulados podem causar às árvores é menor, já que não há necessariamente absorção pelas folhas (Bernatzky, 1978). Embora o material particulado seja geralmente pouco prejudicial para as plantas, sua potencial influência negativa pode variar dependendo da quantidade que se acumula nas folhas. Isso ocorre devido à obstrução dos estômatos, que por sua vez afeta as trocas gasosas, como evidenciado pela diferença nos níveis médios de produção de clorofila entre as duas áreas amostradas. Essa interferência prejudica o crescimento saudável das plantas.

Os indivíduos localizados no Ponto Controle, por outro lado, parecem não ter sofrido danos significativos na fotossíntese. Isso se deve à maior distância do local de emissão de material particulado e à presença de obstáculos topográficos, que dificultam a deposição dessas partículas nocivas. Conseqüentemente, os indivíduos no Ponto Controle puderam direcionar seus recursos para o crescimento, aproveitando a atividade fotossintética, ao contrário dos indivíduos no Ponto Poluído, que tiveram que alocar mais recursos para a manutenção de seus tecidos vegetais devido às condições adversas.

Os resultados da espectrometria por ICP-OES do material particulado presente na superfície adaxial das folhas de *Piper gaudichaudianum* revelaram a presença de diversos elementos químicos metálicos em ambos os pontos de amostragem. A concentração e a diversidade de metais foram significativamente mais elevadas nas populações do Ponto Poluído em comparação com Ponto Controle. Notavelmente, o silício apresentou uma concentração inferior no PC, enquanto no PP, sua presença foi substancialmente elevada. Essa disparidade sugere uma possível origem desse

elemento a partir da fonte emissora próxima, ou seja, da atividade mineradora nas proximidades.

Além do silício, identificaram-se metais pesados e outros elementos, como ferro, zinco, magnésio, alumínio e manganês. Esses elementos parecem estar associados à exploração de rochas quartzosas, que são extraídas e britadas na região. Esses resultados destacam a importância de monitorar e avaliar os efeitos da atividade mineradora na qualidade do ar e no ambiente circundante, especialmente em áreas onde a planta *Piper gaudichaudianum* está presente.

O espalhamento de material particulado para a atmosfera pode afetar por quilômetros a qualidade do meio ambiente. Neste contexto, é importante destacar que, de acordo com Guarino et al. (2021), o biomonitoramento emerge como uma abordagem confiável e economicamente viável para avaliar a qualidade do ar. A capacidade das plantas em acumular contaminantes em diversos órgãos ou tecidos, tais como frutos, raízes, caules e folhas, tem sido amplamente explorada em âmbito global. É crucial notar que as partículas de poeira exercem influência sobre a fisiologia das plantas, provocando alterações em diversos parâmetros fisiológicos e bioquímicos em sua estrutura. Os pecíolos das folhas, por exemplo, são um dos mais excelentes dispositivos de captura de poluentes através da absorção e difusão (Karmakar et al., 2021). Para assegurar a saúde da população e preservar o meio ambiente, a Resolução nº 491/2018 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018) definiu 240 µg/m³ como o padrão nacional de qualidade do ar para partículas totais em suspensão após 24 horas de amostragem. No entanto, é importante destacar que essa concentração de material particulado presente nas folhas de *Piper gaudichaudianum* resulta de um período mais longo de acumulação, para o qual o Conama não estabeleceu regulamentação específica.

Portanto, os resultados obtidos neste estudo foram analisados mediante a comparação entre os locais de amostragem, revelando que o Ponto Poluído, com maior influência antrópica, apresentou concentrações mais elevadas de material particulado, enquanto o Ponto de Controle, com menor impacto humano, registrou concentrações mais baixas. As plantas acumulam/aprisionam poluentes e, como resultado, podem ajudar a determinar as

concentrações de poluentes e revelar as tendências espaço-temporais dos poluentes atmosféricos. Portanto, as plantas são um método simples, de baixo custo e eficaz para monitorar os poluentes atmosféricos (UIA, 2021).

Nessa perspectiva, a utilização da espécie *Piper gaudichaudianum* como biomonitora passiva emerge como uma alternativa altamente eficaz na detecção de potenciais impactos ambientais. Isso se deve à sua viabilidade econômica, que representa uma vantagem significativa tanto para as entidades públicas quanto para os órgãos ambientais.

Conclusões

Este estudo revela que a qualidade do ar é afetada pela poluição atmosférica, o que, por sua vez, tem um impacto significativo no desenvolvimento estrutural da espécie estudada. Esta espécie demonstra ser um indicador confiável da qualidade do ar ambiente. Os resultados obtidos para a espécie *Piper gaudichaudianum* evidenciam que as diferenças estruturais observadas entre as plantas localizadas na área poluída e na área de controle são diretamente causadas pelos danos provocados pela presença de poluentes particulados na atmosfera.

As análises morfológicas (como a área foliar específica - AEF) e fisiológicas (como os teores de clorofila) sugerem alterações nos padrões de investimento das plantas, com uma mudança notável entre o crescimento e a manutenção. Além disso, indicam a ocorrência de processos de fotoinibição nas plantas expostas à poluição atmosférica. É importante destacar que as plantas localizadas fora do Ponto Poluído (grupo de controle) exibem diferenças significativas em relação aos atributos analisados, indicando uma integridade estrutural superior quando não estão expostas à poluição.

Contudo, é fundamental destacar que, embora as folhas sejam as partes das plantas mais sensíveis às mudanças ambientais, é de suma importância ampliar as investigações morfoanatômicas para abranger outras estruturas, bem como considerar os componentes químicos da rocha que originam o material particulado, e até mesmo incorporar diversas fases fenológicas das plantas. Isso aumentará as possibilidades de compreender os danos causados pelos poluentes atmosféricos de maneira mais abrangente no corpo da planta.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento CNPq pela cessão de bolsa ao primeiro autor. Ao Fundo de Amparo à Pesquisa da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE pelo fomento à pesquisa liberado ao segundo autor.

Referências

- Bernatzky, A., 1978. Tree ecology and preservation. Elsevier Scientific, New York, pp. 357.
- Borcard, D., Gillet, F.; Legendre, P., 2011. Numerical ecology with R. Springer, New York, pp. 306.
- Braga, F.M., et al. 2021. Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂. Research, Society and Development, 10(7), e1670113789. doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16701>.
- Cavallaro, R., Melo Júnior, J. C. F., Bonatti-Chaves, M., Renner, G. D. R., 2018. Avaliação do efeito da poluição atmosférica em populações urbanas de *Inga edulis* Mart. (Fabaceae) por meio do método de biomonitoramento passivo. Cadernos de Publicações UNIVAG, 8(1), 85-108.
- Climate Data. Clima: Joinville, 2022. Disponível: <http://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/santa-catarina/joinville-4496/>. Acesso: 28 ago. 2022.
- Conama. Conselho nacional do meio ambiente. Ministério do meio ambiente. Resolução nº3 de 28/09/1990, 2022. Disponível: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0003-280690.PDF>. Acesso: 15 ago. 2022.
- Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama n.º 491, de 19 de novembro de 2018. Acesso em: 26 jun. 2023. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>.
- CETESB. Relatório da qualidade do ar no Estado de São Paulo. Secretaria de Meio ambiente. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wpcontent/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-deQualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo2021.pdf>.
- CETESB. Efeitos da poluição atmosférica na vegetação, 2022. Disponível: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/efeitos-da-poluicao/>. Acesso: 16 ago. 2022.

- Corada, K., Woodward, H., Alaraj, H., Collins, C.M., de Nazelle, A., 2021. A systematic review of the leaf traits considered to contribute to removal of airborne particulate matter pollution in urban areas. *Environ. Pollut.* 269, 116104 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116104>.
- Guarino, F., Improta, G., Triassi, M., Castiglione, S., & Cicatelli, A., 2021. Air quality biomonitoring through *Olea europaea* L.: The study case of “Land of pyres”. *Chemosphere*, 282, 131052
- Haverić, A., Četković, T., Hasanović, M., Pourrut, B., Klačar, L. Č., Omanović, M. H., ... & Haverić, S., 2022. P07-34 Wild privet (*Ligustrum vulgare* L.) a reliable plant model for the air-pollution biomonitoring. *Toxicology Letters*, 368, S132
- Heerdt, S.T., Melo Jr, J.C.F., 2022. Avaliação do efeito da poluição atmosférica em populações urbanas de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos (Bignoniaceae) em Joinville, SC.
- Hendry, G.A.F., Price, A.H., 1993. Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: Hendry, G.A.F.; Grime, J.P. *Methods in comparative plant ecology*. London: Chapman & Hall, 148-152.
- Huang, Y., Bao, M., Xiao, J., Qiu, Z., Wu, K., 2019. Effects of PM_{2.5} on cardio-pulmonary function injury in open manganese mine workers. *International journal of environmental research and public health*, 16(11), p.2017.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/joinville.html>. Acesso: 28 ago. 2022.
- Inoue, M. T.; Reissmann, C. B. Efeitos da poluição na fotossíntese, dimensões da folha, deposição de particulados e conteúdo de ferro e cobre em alfeneiro (*Ligustrum lucidum*) da arborização de Curitiba, PR. *Revista Floresta*. 1991; 21(12): 3-11.
- IPCC - Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change. Cambridge University Press. In Press. (2021).
- Jamie L et al, 2023. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, USA. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101651>
- Joinville Cidade em Dados, 2019. Disponível: <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/Joinville-Cidade-em-Dados-2019-Ambiente-Natural.pdf>. Acesso: 15 ago. 2022.
- Karmakar, D., Deb, K., & Padhy, P. K., 2021. Ecophysiological responses of tree species due to air pollution for biomonitoring of environmental health in urban area. *Urban Climate*, 35, 100741.
- Kelly, F.J., Fussell, J.C., 2015. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environ Geochem Health*, 37, 631–649.
- Lambers, H., Chapin III, F.S., Pons, T.L. 1998. *Plant physiological ecology*, 3ed. Springer Verlag, New York.
- Linder, S. A proposal for the use of standardized methods for chlorophyll determinations in ecological and ecophysiological investigations. *Physiologia Plantarum*. 1974; 32(2):154156. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1974.tb03743.x>
- Locosselli, G. M. et al. The role of air pollution and climate on the growth of urban trees. *Science of Total Environment*, v.666, p.652-61, 2019.
- Melo Júnior, J. C. F., Raimundo C. M., Amorim, M. W., 2014. Efeito da poluição atmosférica em folhas de *Tibouchina granulosa* (Desr.) Cogn. (Melastomataceae). *Acta Biológica Catarinense*, 1(1), 65-72.
- Miller, R.W., 2007. *Urban forestry: planning and managing urban greenspaces*. 2 ed. Prentice Hall, New Jersey, pp. 502.
- Nações Unidas. Centro de Imprensa. Notícias. Novas diretrizes da OMS sobre qualidade do ar reduzem valores seguros para poluição. Brasília, DF: Casa ONU Brasil, 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/145721-novas-diretrizes-da-oms-sobre-qualidade-do-ar-reduzem-valores-seguros-para-poluicao>. Acesso em: 29 set. 2023.
- Pérez-Harguindeguy, N.; Díaz, S.; Garnier, E.; Lavorel, S.; Poorter, H.; Jaureguiberry, P.; Bret-Harte, M.S.; Cornwell, W.K.; Craine, J.M.; Gurvich, D.E.; Urcelay, C.; Veneklaas, E.J.; Reich, P.B.; Poorter, L.; Wright, I.J.; Ray, P.; Enrico, L.; Pausas, J.G.; De Vos, A.C.; Buchmann, N.; Funes, G.; Quétier, F.; Hodgson, J.G.; Thompson, K.; Morgan, H.D.; Ter Steege, H.; Van der Heijden, M.G.A.; Sack, L.; Blonder, B.; Poschlod, P.; Vaieretti, M.V.; Conti, G.; Staver, A.C.; Aquino, S.; Cornelissen, J.H.C., 2013.

- REFLORA. Plantas do Brasil: Resgate Histórico e Herbário Virtual para o Conhecimento e Conservação da Flora Brasileira. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2022. Disponível: <http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUCt/>. Acesso: 16 ago. 2022.
- Santos, G. S., Santos, M. D., Melo Junior, J. C. F., Chaves, M. B., Mouga, D. M. S., Gumboski, E. L., 2019. Avaliação do potencial bioindicador de *Alchornea glandulosa* no monitoramento da poluição atmosférica. *Acta Biológica Catarinense*, 6(1), 93–102.
- Santos, M.A D., 2017. Poluição do Meio Ambiente, 1 ed. LTC, Rio de Janeiro.
- Santos, L. L. S.; et al, 2020 Presença de metais pesados em asas de *Hamadryas Februa Hübner*, 1823 (Lepidoptera, Nymphalidae, Biblidinae). *Revista Univap*, 26, 16-25, 2020.
- SiBBr. Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira. Disponível: https://sibbr.gov.br/?lang=pt_BR/. Acesso: 16 ago. 2022.
- Souza, V.C., Lorenzi, H., 2012. Botânica Sistemática. Guia ilustrado para identificação das famílias de fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG III, 3. ed. Instituto Plantarum, São Paulo.
- Souza, M.G. et al, 2008. Estratégias de utilização de luz e estabilidade do desenvolvimento de plântulas de *Cordia superba* Cham. (Boraginaceae) crescidas em diferentes ambientes luminosos.
- UIA. Urban Innovative actions. Disponível: Biomonitoramento: uma forma alternativa de monitorar a poluição do ar em Portici (uia-initiative.eu). Acesso: 30 set. 2023.
- US-EPA. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. PM pollution. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution>. Acesso em 06 mai 2023.
- Vormittag, E. da M. P. A. de A. et. al, 2021. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Estudos Avançados*, São Paulo, 35, 7-30.
- WHO, 2021. What are the WHO Air quality guidelines: Improving health by reducing air pollution. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-airquality-guideline>. Acesso: 22 ago. 2022.
- Yuncker, T.G., 1973. The Piperaceae of Brasil II: Piper. *Hoehnea* 3, pp. 29- 284