BIOMONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR DO POLO QUÍMICO DE GUAIÚBA COM *Tradescantia pallida* var. *purpurea*: EFEITOS GENOTÓXICOS POR BIOENSAIOS DE MICRONÚCLEO E MUTAÇÃO EM PELO ESTAMINAL ASSOCIADA A DADOS CLIMÁTICOS

Gabriel Alves Desiderio; Claúdia Alessandra Fortes Aiub

RESUMO

A poluição atmosférica compromete a saúde humana e o equilíbrio dos ecossistemas, sendo associada a problemas respiratórios, cardiovasculares e à degradação ambiental. Nesse contexto, o biomonitoramento com *Tradescantia pallida* var. *purpurea* (Rose) D.R. Hunt se destaca como uma ferramenta eficiente, sensível e de baixo custo para detectar efeitos genotóxicos provocados por poluentes atmosféricos. Dessa forma, este estudo avaliou a qualidade do ar no Polo Químico de Guaiúba (PQG) por meio dos bioensaios de mutação em pelo estaminal (TRAD-SH) e micronúcleo (TRAD-MCN) com *T. pallida*, além de dados climáticos e poluentes atmosféricos. Trata-se de uma pesquisa experimental com abordagem quantitativa realizada entre fevereiro e julho de 2024 em dois pontos, um na Unidade de Produção de Mudas do Campus das Auroras (UPMA) e outro no PQG. Os dados de biomonitoramento, clima e poluentes atmosféricos foram coletados quinzenalmente mediante aplicação dos testes de monitoramento acesso ao *site* do Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC) e do *The Weather Channel*. As células foram analisadas por estereomicroscópio e microscopia óptica, e os dados tratados estatisticamente por análise de variância (ANOVA *Two-Way*) e Correlação de Pearson. Os resultados mostraram diferenças estatisticamente significativas na frequência de TRAD-SH ($F = 2{,}589$, $p < 0{,}01$; $\eta p^2 = 0{,}227$) e TRAD-MCN ($F = 4{,}483$, $p < 0{,}01$; $\eta p^2 = 0{,}362$) ao comparar os dias de coleta em análise global dos dados, indicando variações ao longo do tempo nos dois testes. No entanto, ao comparar os dois pontos diretamente (UPMA e PQG), não houve diferença significativa para nenhuma das análises, sugerindo que os impactos genotóxicos foram semelhantes nos dois locais tanto para TRAD-SH ($F = 0.195$, $p > 0{,}05$; $\eta p^2 = 0{,}002$) quanto TRAD-MCN ($F = 0{,}905$, $p > 0{,}05$; $\eta p^2 = 0{,}011$). As análises estatísticas revelaram correlações importantes entre a frequência de micronúcleos e fatores ambientais. No ponto UPMA, a frequência de micronúcleos correlacionou-se positivamente com ozônio ($rs = 0{,}663$, $p < 0{,}05$) e no PQG esteve associada ao material particulado PM10 ($rs = 0{,}639$, $p < 0{,}05$), enquanto PM2,5 apresentou correlação com cobertura de nuvens altas ($rs = 0{,}669$, $p < 0{,}05$). Entretanto, foram observadas correlações diretas entre a concentração de ozônio e a velocidade do vento em ambos os pontos ($p < 0{,}05$) e indiretas entre a concentração de material particulado 2,5 e 10. Apesar da expectativa de maior impacto ambiental no PQG, os resultados indicam que a depreciação da qualidade do ar observada foi semelhante entre os locais avaliados, tendo em vista o indicativo de frequências em ambos os testes**.** Diante disso, os resultados indicam a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do ar na região e apontam para um maior aprofundamento acerca dos reais impactos na qualidade de vida humana, animal e vegetal.

Palavras-chave: Toxicologia; Poluição do Ar; Controle da Qualidade do Ar; Indústria Química

AIR QUALITY BIOMONITORING IN THE GUAIÚBA CHEMICAL PARK USING *Tradescantia pallida* var. *purpurea*: GENOTOXIC EFFECTS ASSESSED BY MICRONUCLEUS AND STAMEN-HAIR MUTATION BIOASSAYS ASSOCIATED WITH CLIMATIC DATA

ABSTRACT

Atmospheric pollution compromises human health and ecosystem balance, being associated with respiratory and cardiovascular problems as well as environmental degradation. In this context, biomonitoring with *Tradescantia pallida* var. *purpurea* (Rose) D.R. Hunt stands out as an efficient, sensitive, and low-cost tool for detecting genotoxic effects caused by atmospheric pollutants. Thus, this study assessed air quality in the Guaiúba Chemical Park (Polo Químico de Guaiúba — PQG) through the stamen-hair mutation bioassay (TRAD-SH) and the micronucleus test (TRAD-MCN) using T. pallida, in addition to climate and atmospheric pollutant data. This is an experimental study with a quantitative approach carried out between February and July 2024 at two sampling sites: one at the Seedling Production Unit of the Auroras Campus (Unidade de Produção de Mudas do Campus das Auroras — UPMA) and the other at the PQG. Biomonitoring, climate, and atmospheric pollutant data were collected biweekly through the application of biomonitoring tests and accessing the websites of the Center for Weather Forecasting and Climate Studies (Centro de Previsão e Estudos Climáticos — CPTEC) and The Weather Channel. Cells were analyzed using a stereomicroscope and optical microscopy, and the data were statistically processed through Two-Way Analysis of Variance (ANOVA Two-Way) and Pearson's Correlation. The results showed statistically significant differences in the frequency of TRAD-SH ($F = 2.589$, $p < 0.01$; $\acute{\eta}p^2 = 0.227$) and TRAD-MCN ($F = 4.483$, $p < 0.01$; $\eta p^2 = 0.362$) when comparing collection days in the overall data analysis, indicating temporal variations in both tests. However, when comparing the two sampling sites directly (UPMA and PQG), no significant difference was observed for either analysis, suggesting that genotoxic impacts were similar at both locations for both TRAD-SH ($F = 0.195$, $p > 0.05$; $\acute{\eta}p^2 = 0.002$) and TRAD-MCN ($F = 0.905$, $p > 0.05$; $\eta p^2 = 0.011$). Statistical analyses revealed significant correlations between micronucleus frequency and environmental factors. At the UPMA site, the micronucleus frequency was positively correlated with ozone ($rs = 0.663$, $p < 0.05$), while at PQG it was associated with PM10 ($rs = 0.639$, $p < 0.05$), and PM2.5 showed a correlation with high cloud cover ($rs = 0.669$, $p < 0.05$). Moreover, direct correlations were observed between ozone concentration and Vento speed at both sites ($p < 0.05$), and inverse correlations between PM2.5 and PM10 concentrations. Despite the initial expectation of greater environmental impact at the PQG, the results indicate that the observed air quality degradation was similar between the evaluated sites, as evidenced by the frequencies obtained in both tests. Therefore, the results highlight the need for continuous air quality monitoring in the region and point to the importance of further investigations into the real impacts on human, animal, and plant life quality.

Keywords: Toxicology; Air Pollution; Air Quality Control; Chemical Industry

INTRODUÇÃO

A degradação da qualidade do ar é fruto direto do desenvolvimento econômico das grandes metrópoles e suas regiões metropolitanas, que a cada dia mais são exploradas como promissoras e estrategicamente pensadas para suprir demandas e necessidades. Impactado substancialmente, o ar, ou sua qualidade, são constantemente monitorados devido sua importância na prosperidade de ecossistemas e essencialidade a uma infinidade de seres vivos (Schneider et al., 2024; Teixeira; Barbério, 2012; Godoi et al., 2021; Campos Júnior et al., 2024).

Todavia, entraves e desafios tornam propício a observação de efeitos sobre a saúde humana e ambiental. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde cerca de 7 milhões de vidas são prematuramente ceifadas por eventos e patologias associados a poluição do ar, como doença cardíaca isquêmica, derrame, doença pulmonar obstrutiva crônica e câncer de pulmão com custos globais em saúde equivalentes a mais de 6% do Produto Interno Bruto (PIB) global (OMS, 2023).

Para o meio ambiente, a dispersão de poluentes atmosféricos é capaz de alterar as pistas olfativas de insetos mediados por voláteis, dificultando sua interação com o meio (Zevallos; Skaldina; Blande, 2025), além de estresse modulado por Espécies Reativas de Oxigênio (ROs) em plantas, causando peroxidação lipídica, modificação de proteínas e danos ao material genético (Molina; Segura, 2021).

Nessa perspectiva, mecanismos de biomonitoramento do ar com plantas são usuais e apresentam alta sensibilidade e baixo custo, tendo em vista que a manutenção de estações de monitoramento requer altos custos e são limitadas quanto ao número de poluentes analisados (Giordano; Spagnuolo; Capozzi, 2021). Além disso, os testes de biomonitoramento são versáteis e podem ser utilizados para a investigação de poluentes em diferentes matrizes como ar, água e solo, com destaque para *Tradescantia pallida* (Rodrigues; Mercuri; Noe, 2023; Rodrigues et al., 2024; Campos Júnior et al., 2024).

Desenvolvidos para a análise de agentes mutagênicos e/ou clastogênicos, os bioensaios com o clone 4430 de *T. pallida* foram extensivamente explorados para análise de compostos químicos e radioativos na década de 1920. Suas características genéticas favoráveis permitiram a concepção de vários tipos de bioensaios, sendo o de mutação em pelo estaminal (TRAD-SH) e

micronúcleo em células mãe de pólen (TRAD-MN) os principais expoentes (Ma; Sparrow; Schairer; Nauman, 1978; Ma et al., 1994).

Como biomonitora, *T. pallida* apresenta elevada sensibilidade a mudanças nos padrões de impurezas, mas também a fatores ambientais e climáticos como temperatura, radiação, umidade, pH, luz e nutrientes (Rodrigues et al., 2024). Além disso, outros fatores como velocidade do vento e cobertura de nuvens podem influenciar indiretamente os eventos em *T. pallida* devido a concentração de poluentes na atmosfera (Samad et al., 2023; Xing; Sun, 2022; Valjarević, 2024; Huang et al., 2023). Dessa forma, *T. pallida* se posiciona como uma importante ferramenta de monitorização de poluentes atmosféricos sobretudo em áreas industriais e produtivas com atividade comercial desenvolvida (Campos et al., 2024).

Assim, o presente estudo busca avaliar a qualidade do ar do Polo Químico de Guaiúba (PQG) por meio dos bioensaios com *Tradescantia pallida* (Rose) D.R Hunt var. *purpurea* (Commelinaceae) de mutação em pelo estaminal (TRAD-SH) e micronúcleo (TRAD-MCN) associados a dados climáticos.

METODOLOGIA

A partir da motivação de avaliar a qualidade do ar do PQG, tomou-se o método experimental com abordagem quantitativa a fim de se estabelecer relações de causa e efeito entre dois pontos de estudo e o impacto na qualidade do ar oriundo de suas localizações geográficas distintas, exposição a poluentes e características de clima e tempo.

Pontos de estudo

Foram estabelecidos dois pontos de estudo com base em suas diferenças socioeconômicas e instalação de indústrias, distantes entre si por aproximadamente 23km (Figura 1a).

O Ponto 1, foi instalado na Unidade de Produção de Mudas do Campus das Auroras (UPMA) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) na cidade de Redenção, localizada no Estado do Ceará, Brasil (-4.218146677359132, -38.7128168645901) (Figura 1a).

A cidade está inserida na macrorregião do Maciço de Baturité e possuía cerca de 28.358 habitantes de acordo com cálculos de população estimada do Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística em 2024 (IBGE, 2024). Além disso, abriga uma parte da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra do Baturité e possui uma considerável área matada (CEARÁ, 2010), com desenvolvimento industrial pouco intensivo. Apesar disso, a cidade fica próxima de pontos de mineração de calcário e indústrias produtoras de tinta, além de algumas fábricas de cerâmicas e tijolos.

O Ponto 2 e de teste, por sua vez, foi introduzido no Polo Químico de Guaiúba (PQG), cidade localizada na região metropolitana da capital cearense Fortaleza (-4.0564620685055806, -38.6386709626123) (Figura 1a).

O PQG teve sua inauguração oficial em 2022 com capacidade para abrigar 29 indústrias e auxiliar na incubação de novos negócios. Atualmente conta com 5 empresas instaladas, e 10 em instalação, do ramo de produtos plásticos, aditivos químicos para saneantes, tintas, papel, cosméticos, cerâmica, demarcação viária e reciclagem em pleno processo de expansão (FIEC, 2024). Guaiúba, por si, abriga uma população estimada de 25.085 habitantes e se destaca pelo constante avanço no desenvolvimento industrial (IBGE, 2024).

Hipóteses de pesquisa

As hipóteses deste estudo foram formuladas da seguinte maneira: H_0 (hipótese nula) – não há diferença entre os dois pontos de estudo nem influência da variação dos parâmetros climáticos e da qualidade do ar; H_1 (hipótese alternativa) – há diferença entre os locais de estudo, com relação aos parâmetros climáticos e à qualidade do ar.

Bioensaios com *Tradescantia pallida* (Rose) D.R Hunt var. *purpurea* (Commelinaceae)

Devido às suas características genéticas oportunas, *T. pallida* tem sido amplamente utilizada no desenvolvimento de testes para avaliar compostos genotóxicos na água, no ar e no solo, sendo, por esse motivo, considerada uma bioindicadora ambiental. Seus principais bioensaios baseiam-se na análise morfológica do material genético e em alterações fenotípicas, destacando-se o teste de mutação em pelo estaminal (TRAD-SH) e o teste de micronúcleos (TRAD-MCN) (Rodrigues, 1999).

O bioensaio TRAD-SH fundamenta-se na observação de mutações mitóticas pontuais que suprimem a expressão do caráter dominante azul, resultando na alteração da coloração das células

do pelo estaminal em plantas heterozigotas para rosa, uma característica recessiva (Rodrigues, 1999). Entretanto no presente estudo, utilizou-se a variedade *purpurea* de *T. pallida* devido sua maior resistência a parasitas e insetos em relação ao clone 4430, além de sua adaptação aos climas tropicais do hemisfério Sul, na qual a coloração se altera de roxo para branco (Suyama et al., 2002).

No bioensaio TRAD-MCN, a ação de agentes genotóxicos, aqui denominados clastogênicos, causa a fragmentação do material genético em células da linhagem meiótica, precursoras do pólen, que se apresentam no estágio de tétrade (quatro núcleos) (Rodrigues, 1999).

Procedimento experimental

Inicialmente 60 mudas foram preparadas e acondicionadas igualmente em floreiras 10 (50cm altura e 15cm de diâmetro). As floreiras foram preparadas com substrato composto de terra peneirada e vermiculita (3:1) devidamente forradas com pedras (Figura 1b). As plantas recebiam luz solar por pelo menos 12h por dia e eram regadas 5 vezes por semana.

As coletas foram realizadas quinzenalmente, de 26 de fevereiro a 16 de julho de 2024 para permitir uma exposição adequada, além da geração de materiais para a análise, e ocorriam no início da manhã e os materiais eram armazenados em caixas térmicas umidificadas para garantir a viabilidade da amostra (Tabela 1). Eram coletados 5 inflorescências e 5 botões florais ainda fechados de cada ponto (UPMA e PQG). No laboratório, o material era sobreposto em placas de Petri, identificado e analisado individualmente.

Tabela 1 – Codificação dos dias de análise

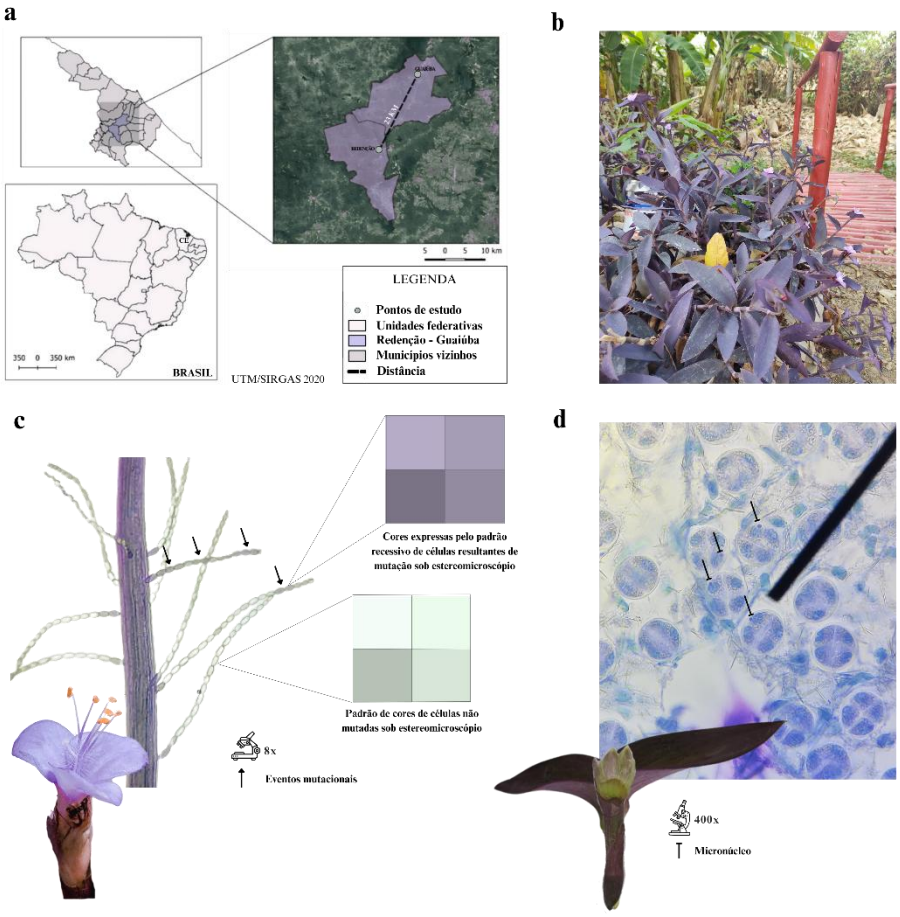
	Análise										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Dia(s)	26/fev.	11 e 12/ mar.	26/ mar.	09/abr.	23/abr.	06/maio	22/maio	04/jun.	18/jun.	02/jul.	16/jul.

Fonte: Autoria própria, 2025

Em TRAD-SH, foi empregado o protocolo modificado de Ma e colaboradores (1994). Dessa forma, eram contados e anotados todos os pelos com suas células (roxas e/ou brancas) de cada um dos 6 estames das inflorescências com o auxílio de óleo de imersão e estereomicroscópio (Opton TIM-2B) no aumento de 8x, sendo considerado evento mutagênico uma célula roxa isolada ou uma sequência dessas (Figura 1c). A frequência era obtida através da equação disposta na Figura 2a.

Para TRAD-MCN, o procedimento foi inspirado no protocolo com alterações de Ma et al. (1978). Assim, cada botão floral era dissecado com o auxílio de uma pinça histológica para a retirada de um grão de pólen, que era colocado sobre a superfície de uma lâmina com 2 gotas de giemsa 5%, sobreposta por uma lamínula, e esmagado com cuidado para a visualização de células em tétrade em microscópio óptico (Nikon Eclipse E100) sob magnificação de 100x e 400x (Figura 1d). A frequência se deu pelo número de micronúcleos multiplicado por 300 dividido pelo número de tétrades totais (Figura 2b).

Figura 1 - Mapa de localização (a), floreiras (b), eventos mutacionais em pelo estaminal (c) e apresentação de micronúcleos em tétrades (d)



Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 2 – Equações para a obtenção da frequência de mutações em pelo estaminal (a) e micronúcleos (b)

a

$$Micronúleo: \frac{(Micronúcleo\ x\ 300)}{Total\ de\ tétrades}$$

b

$$Mutação\ em\ pelo\ estaminal: \frac{(Eventos\ mutacionais\ x\ 300)}{Total\ de\ células\ brancas}$$

Fonte: Autoria própria, 2025

Dados climáticos e de qualidade do ar

Os dados climáticos e de qualidade do ar foram coletados seguindo conforme o procedimento experimental (Tabela 1) de maneira *on-line*, respectivamente, dos sites do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) (https://www.cptec.inpe.br/) e do The Weather Channel (https://weather.com) por serem de gratuitos e de fácil acesso.

Análise estatística e organização dos dados

Os conjuntos de dados foram compilados no *software* Microsoft Excel 365, analisados e organizados no pacote estatístico Statistical Package for the Social Sciences (SPPS) versão 20.0 e GraphPad Prism 8. As figuras foram criadas na plataforma de design gráfico Canva e o mapa no *software* QGIS 2.2.

As frequências de TRAD-SH e TRAD-MCN entre os pontos, dias e interações foram avaliadas por análise de variância (ANOVA *Two-Way*), considerando significância estatística de 5% (*p-valor*<0,05) e homogeneidade de variância por Levene quando *p-valor*>0,05.

Além disso, foram considerados os tamanhos de efeito (ηp^2) interpretados em pequeno (≥0,01), médio (≥0,06) e grande (≥0,14) de acordo com critérios adaptados de Cohen (1992).

Foi analisado ainda a normalidade dos dados por Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk e observada a distribuição normal dos dados. Com isso, foram cruzadas informações de frequência e clima, e verificada a ocorrência ou não de relações estatisticamente significativas (*p-valor*<0,05) por correlação de Pearson, classificada por Rumsey (2021) em forte (|±0,70|), moderada (|±0,50|) e fraca (|±0,30|).

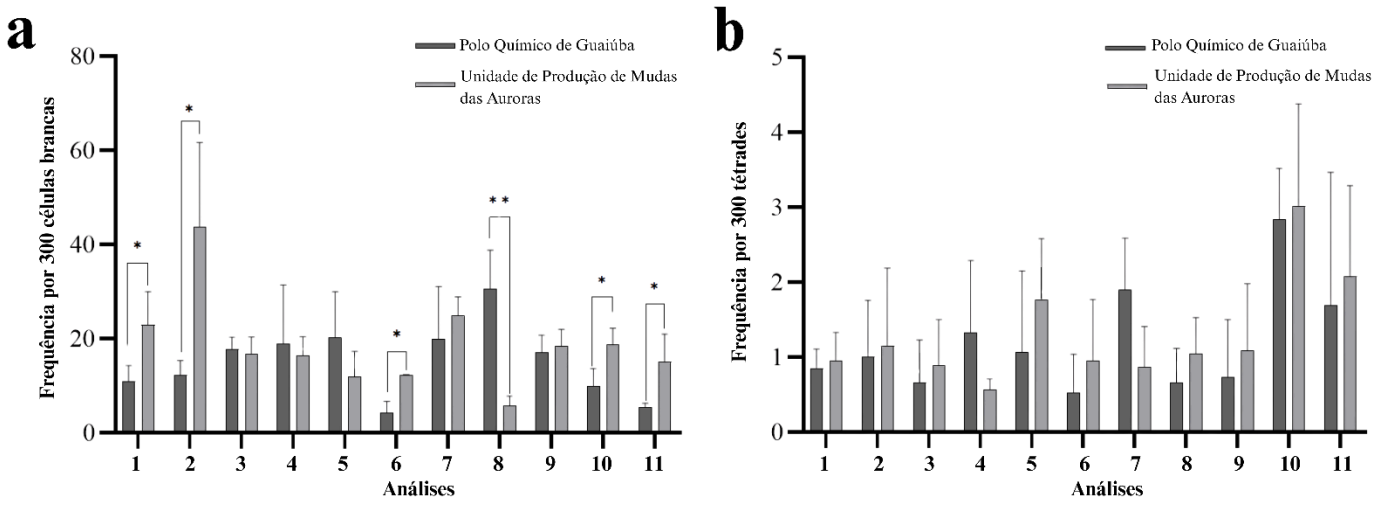
RESULTADOS

Com ênfase na avaliação da frequência de TRAD-SH, as análises demonstraram maior impacto na região da UPMA com resultados expressivos ao longo dos dias de coleta (Gráfico 1a). Desses, 7 das 11 análises apresentaram maiores frequências por 300 células brancas contadas, sendo 5 resultados estatisticamente significativos (p <0,05). As maiores frequências de mutações para a UPMA e o PQG foram observadas, respectivamente, nos dias 11 e 12 de março e 04 de junho (p <0,01), e as menores em 04 de junho e 06 de maio (p <0,05) (Gráfico 1a).

Além disso, foi possível constatar homogeneidade das variâncias (homoscedasticidade) (Levene p>0,05) e tamanho de efeito grande (>0,14) na maior parte das análises, com destaque para as do dia 06 de maio (F=12,08, p=0,707; ηp^2=0,707) e 04 de junho (F=16,7, p=0,004; ηp^2=0,676) (Tabela 2).

Em consonância, a frequência de micronúcleos foi maior no ponto UPMA, que apresentou uma quantidade expressiva no decorrer das análises, enquanto o PQG registrou as menores frequências em 9 dos 11 dias de investigação. Mesmo assim, o dia 02 de julho marcou as maiores frequências para ambos os pontos, e as menores no dia 06 de maio e 09 de abril para o PQG e UPMA, respectivamente. Apesar disso, diferente dos resultados em TRAD-SH nenhuma diferença foi considerada significativa (p<0,05) (Gráfico 1b).

Gráfico 1 – Análise de variância (ANOVA *Two-Way*) dos bioensaios de mutação em pelo estaminal (a) e micronúcleo (b) entre os pontos de estudo



* Resultado estatisticamente significativo por ANOVA *Two-Way* (p <0,05).

** Resultado estatisticamente significativo por ANOVA *Two-Way* (p <0,01).

Fonte: Autoria própria, 2025

Entretanto, expuseram considerável homoscedasticidade (Levene p>0,05) e elevados tamanhos de efeito, sobretudo nas duas análises na qual o PQG apresentou maior frequência (Apr 09th, F = 1,01, p = 0,166; ηp^2 = 0,35 e May 22th, F = 3,56, p = 0,155; ηp^2 = 0,54) (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise de variância dos bioensaios de mutação em pelo estaminal (a) e micronúcleo (b) entre os pontos de estudo por ANOVA *Two-Way*

a

	ANOVA			
	F-valor	***p-valor***	**ηp²**	**Levene (*p-valor*)**
1	8,66	0,019*	0,520	0,326#
2	7,11	0,028*	0,471	0,082#
3	0,156	0,704	0,019	0,513#
4	0,039	0,849	0,005	0,218#
5	1,03	0,339	0,114	0,12#
6	12,08	0,018*	0,707	0,073#
7	0,396	0,552	0,062	0,015#
8	16,7	0,004**	0,676	0,192#
9	0,032	0,865	0,006	0,971#
10	9,695	0,014*	0,548	0,884#
11	6,73	0,032	0,457	0,049

b

	ANOVA			
	F-valor	***p-valor***	**ηp²**	**Levene (*p-valor*)**
1	0,218	0,654	0,03	0,129#
2	0,055	0,821	0,008	0,568#
3	0,268	0,627	0,051	0,964#
4	1,01	0,166	0,345	0,011
5	0,9	0,379	0,13	0,605#
6	0,73	0,432	0,127	0,303#
7	3,56	0,155	0,543	0,638#
8	0,919	0,392	0,187	0,957#
9	0,446	0,523	0,053	0,694#
10	0,054	0,824	0,009	0,053#
11	0,12	0,743	0,023	0,502#

* Resultado estatisticamente significativo por ANOVA *Two-Way* (p <0,05);

** Resultado estatisticamente significativo por ANOVA *Two-Way* (p <0,01);

Homogeneidade de variância pelo Teste de Levene (p >0,05).

Fonte: Autoria própria, 2025

Quando analisados em conjunto, foi possível observar diferenças significativas entre os dias de análise para TRAD-SH (F = 2,589, p <0,01; ήp² = 0,227) e TRAD-MCN (F = 4,483, p <0,01; ηp² = 0,362), revelando efeito do tempo em cada dia de observação. Todavia, a mesma diferença estatística não foi verificada quando os pontos de análise (UPMA e PQG) entraram em evidência, sugerindo um cenário de impacto na qualidade do ar semelhante nos dois pontos de estudo. Em contrapartida, as interações entre os grupos (dias de análise x pontos) mostrou que as frequências de micronúcleo (F = 4,125, p <0,01; ηp² = 0,319) e mutações em pelo estaminal (F = 2,391, p <0,05; ηp² = 0,232) evoluem em magnitudes diferentes ao longo dos dias de análise e dos pontos avaliados (Tabela 3).

Tabela 3 – Análise de variância dos bioensaios por dias, pontos e interação de conjuntos (dias-pontos) por ANOVA *Two-Way*

	ANOVA							
	TRAD-SH				TRAD-MCN			
	F-valor	**p-valor**	**np²**	**Levene (p-valor)**	**F-valor**	**p-valor**	**np²**	**Levene (p-valor)**
Dias de análise	2.589	0.008**	0.227	0.000	4.483	0.000**	0.362	0,005
Pontos	0.195	0.659	0.002		0.905	0.344	0.011	
Dias x Pontos	4.125	0.000**	0.319		2.391	0.015*	0.232	

* Resultado estatisticamente significativo por ANOVA *Two-Way* (p <0,05).

** Resultado estatisticamente significativo por ANOVA *Two-Way* (p <0,01).

Fonte: Autoria própria, 2025

As correlações entre as frequências TRAD-SH e TRAD-MCN entre o ponto UPMA e teste com os dados de clima e qualidade do ar revelaram relações importantes. No UPMA, ao longo das análises, os níveis de ozônio (O_3) apresentaram correlação forte e positiva com a frequência de micronúcleos (r_s = 0.663, p<0,05), velocidade do vento (r_s = 0.623, p <0,05) e pressão ao nível do mar (r_s = 0.637, p <0,05). Além disso, cobertura de nuvens altas interagiu fortemente com temperatura (r_s = 0.683, p <0,05) e pressão ao nível do mar (r_s = -0.773, p <0,05), assim como umidade (r_s = 0.658, p <0,05) e nuvens baixas (r_s = 0.689, p <0,05) (Tabela 4).

No PQG, a frequência de micronúcleos apresentou correlação forte e positiva com PM_{10} (r_s= 0.639, p <0,05), bem como a cobertura de nuvens médias com temperatura (r_s = 0.623, p <0,05) e nuvens altas (r_s = 0.689, p <0,05). A umidade, por sua vez, se correlacionou negativamente com a velocidade do vento (r_s = -0.766, p <0,01) enquanto esteve associada a nuvens altas (r_s = 0.753, p <0,01) e $PM_{2,5}$ (r_s = 0.727, p <0,05). Por outro lado, a correlação entre a velocidade do vento com nuvens altas (r_s = -0.804, p <0,01) e PM2,5 (r_s = -0.850, p <0,01) foi forte e negativa, enquanto com O_3 foi positiva (r_s = 0.746, p <0,01). Na ocasião os níveis de O_3 também estiveram associados a pressão ao nível do mar (r_s = 0.617, p <0,05). Cobertura de nuvens altas apresentou correlações estatisticamente significativa com níveis de $PM_{2,5}$ em nosso estudo (r_s = 0.669, p <0,05) (Tabela 5).

Tabela 3 – Correlações entre os bioensaios de micronúcleo (MCN), mutação em pelo estaminal (SH) com dados climáticos e poluentes atmosféricos do ponto UPMA por Correlação de Pearson

	UPMA												
	MCN	**SH**	**Temperatura (ºC)**	**Precipitaçã (mm/H)**	**Humidade (%)**	**Vento (m/s)**	**Pressão atmosférica ao nível do mar (hPa)**	**Nuvens baixas (%)**	**Nuvens médias (%)**	**Nuvens altas (%)**	**PM 2,5 (µg/m³)**	**PM 10 (µg/m³)**	**O_3 (µg/m³)**
MCN	1.000												
SH	-0.084	1.000											
Temperatura (ºC)	-0.084	0.264	1.000										
Precipitação (mm/H)	-0.115	0.085	0.362	1.000									
Umidade (%)	-0.553	0.489	0.276	0.621	1.000								
Vento (m/s)	0.081	-0.204	-0.526	-0.159	-0.465	1.000							
Pressão atmosférica ao nível do mar(hPa)	0.560	0.142	-0.411	-0.291	-0.433	0.469	1.000						
Nuvens baixas (%)	-0.394	0.023	0.071	0.579	0.658**	-0.398	- 0.553	1.000					
Nuvens médias (%)	0.090	-0.153	0.111	0.052	0.144	-0.228	- 0.098	-0.311	1.000				
Nuvens altas (%)	-0.401	-0.123	0.683*	0.404	0.491	-0.423	-0.773**	0.441	0.135	1.000			
PM 2,5 (µg/m³)	0.036	-0.566	-0.080	-0.148	-0.102	-0.538	-0.240	0.080	0.488	0.111	1.000		
PM 10 (µg/m³)	-0.401	0.092	-0.301	-0.429	-0.153	0.105	-0.088	-0.434	0.272	-0.241	0.167	1.000	
O_3 (µg/m³)	0.663*	-0.308	-0.199	-0.127	-0.532	0.623*	0.637*	-0.463	0.066	-0.394	-0.223	-0.412	1.000

* Resultado estatisticamente significativo por Correlação de Pearson (p <0,05).

** Resultado estatisticamente significativo por Correlação de Pearson (p <0,01)

Fonte: Autoria própria, 2025

Tabela 4 - Correlações entre os bioensaios de micronúcleo (MCN), mutação em pelo estaminal (SH) com dados climáticos e poluentes atmosféricos do Polo Químico de Guaiúba (PQG) por Correlação de Pearson

	Polo Químico de Guaiúba												
	MN	**SH**	**Temperatura (ºC)**	**Precipitação (mm/H)**	**Umidade (%)**	**Vento (m/s)**	**Pressão atmosférica ao nível do mar(hPa)**	**Nuvens baixas (%)**	**Nuvens médias (%)**	**Nuvens altas (%)**	**PM 2,5 (µg/m³)**	**PM 10 (µg/m³)**	**O³ (µg/m³)**
MN	1.000												
SH	-0.216	1.000											
Temperatura (ºC)	-0.009	0.207	1.000										
Precipitação (mm/H)	-0.096	-0.143	-0.058	1.000									
Umidade (%)	-0.178	0.140	0.191	0.578	1.000								
Vento (m/s)	0.402	-0.410	-0.465	-0.178	-0.766**	1.000							
Pressão atmosférica ao nível do mar(hPa)	0.502	-0.065	-0.245	-0.159	-0.323	0.464	1.000						
Nuvens baixas (%)	-0.246	-0.011	-0.093	-0.190	0.384	-0.554	-0.102	1.000					
Nuvens médias (%)	-0.170	0.329	0.623*	0.332	0.504	-0.597	-0.446	-0.263	1.000				
Nuvens altas (%)	-0.270	-0.045	0.415	0.356	0.753**	-0.804**	-0.560	0.293	0.689*	1.000			
PM 2,5 (µg/m³)	-0.086	0.296	0.573	0.047	0.727*	-0.850**	-0.332	0.504	0.413	0.669*	1.000		
PM 10 (µg/m³)	0.639*	0.565	0.185	-0.379	-0.279	-0.210	-0.205	0.026	0.004	-0.099	0.096	1.000	
O³ (µg/m³)	0.579	-0.466	0.034	-0.114	-0.444	0.746**	0.617*	-0.516	-0.309	-0.513	-0.437	-0.410	1.000

* Resultado estatisticamente significativo por Correlação de Pearson (p <0,05)

** Resultado estatisticamente significativo por Correlação de Pearson (p <0,01)

Fonte: Autoria própria, 2025

DISCUSSÃO

Os resultados da análise da qualidade do ar evidenciaram um considerável potencial genotóxico do PQG e mais substancialmente na UPMA, marcado pelas maiores frequências de micronúcleos e mutações em pelos estaminais.

Apesar disso, a análise global entre os pontos não mostrou diferença estatística, sugerindo um impacto semelhante nos dois locais de estudo ao longo do período de investigação. Somado a isso, das correlações testadas apenas PM_{10} no PQG e ozônio no ponto UPMA interagiram com micronúcleos, estabelecendo relação estatística direta na geração de eventos de clastogênese.

Sensíveis às alterações do meio ambiente, os testes de biomonitoramento com *T. pallida* captam pequenas quantidades de poluentes e dão subsídios tangíveis para a avaliação de parâmetros de qualidade do ar. A literatura aponta para uma forte associação dos bioensaios à áreas de grande tráfego de veículos movidos a combustíveis fósseis ou próximos a rodovias (Schneider et al., 2024; Teixeira; Barbério, 2012; Godoi et al., 2021; Campos et al., 2024), industrializadas ou em processo de industrialização com destaque tanto para análises da água de rios (Khosrovya et al., 2022) e solo de complexos industriais (Šiukšta et al., 2019), quanto do ar em fábricas de cerâmica (Silva et al., 2019; Campos et al., 2016) e indústrias químicas (Kim et al., 2003).

Apesar dos avanços no desenvolvimento de matérias-primas sustentáveis, reciclagem e processos produtivos verdes (Blank et al., 2020; Patti; Acierno, 2022), as indústrias químicas de materiais plásticos são potenciais geradoras de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), conhecidos por seus efeitos clastogênicos em *T. pallida* (Kim et al., 2003), e microplásticos, poluentes com características favoráveis para dispersão e contaminação de ecossistemas, além de gerar danos à saúde humana (Gupta et al., 2023).

A queima de combustíveis fósseis também é um fator primordial para a geração de poluentes químicos e físicos, tendo em vista que a combustão gera partículas em suspensão capazes de se bioacumularem em tecidos vegetais ou mesmo serem inaladas por outros seres vivos (Maciejczyk; Chen; Thurston, 2021; Campos et al., 2024).

Enquanto suspensos, os conhecidos Materiais Particulados (PM) 2,5 têm sua viabilidade acrescida pela presença de metais e outros elementos reativos em sua composição. Níquel (Ni), ferro (Fe), cobre (Cu) e vanádio (V) são exemplos de metais conhecidos por causarem estresse

oxidativo, além de tiocompostos que auxiliam no processo (Maciejczyk; Chen; Thurston, 2021; Campos et al., 2024**).**

Estudos demonstram que a quantidade de PM na atmosfera, o bioacúmulo de metais pesados e o tráfego de veículos estão associados à genotoxicidade em *T. pallida*, com aumento significativo na frequência de micronúcleos (Campos et al., 2024; Schneider et al., 2024; Teixeira; Barbério, 2012; Godoi et al., 2021).

Diante disso, Chiquetto e colaboradores (2021) constataram que, durante uma greve de caminhoneiros no Brasil, mesmo com a manutenção dos níveis de $PM_{2,5}$, PM_{10} e dióxido de nitrogênio (NO_2), além de um aumento exclusivo de ozônio (O_3), houve uma redução de 50% na emissão de poluentes primários, como monóxido de carbono (CO) e óxido nítrico (NO) (Chiquetto et al., 2021).

Nesse contexto, atribuímos o aumento de eventos no ponto UPMA ao fluxo constante de veículos de grande porte, como ônibus e caminhões da própria universidade, além de máquinas de construção — especialmente aqueles movidos a diesel (Parra et al., 2024; Carvalho-Oliveira et al., 2005). Isso se deve ao fato de que, durante o período de coleta e análise, a universidade passava por um intenso processo de urbanização.

Além disso, é possível destacar a atividade de mineração de calcário próxima a UPMA realizada por indústrias produtoras de tinta, cal, calcário agrícola e dolomita, que contribuem para o aumento da deposição de partículas e gases na atmosfera (Peng et al., 2016; Fugiel et al., 2017). Ademais, por estar situada na base de uma formação rochosa (maciço residual), a variação de elementos climáticos, como vento e temperatura, pode ter atuado em sinergia para intensificar a concentração de poluentes atmosféricos (Samad et al., 2023; Giovannini et al., 2020; Xing; Meiping, 2022; Silveira; Bastos; Meira, 2023)

Em nosso estudo, a interação inversamente proporcional entre a velocidade do vento, $PM_{2,5}$ e PM_{10} sobretudo no PQG (p <0,01) ilustram o cenário supracitado e reforçam a influência desse fator na concentração de poluentes, mesmo a velocidade do vento variando proporcionalmente com as concentrações de O_3 em oposição a ideia.

Por outro lado, assim como em Teixeira e Barbério (2012), Soares e colaboradores (2023), as variações relativas à temperatura e precipitação não influenciaram a geração de micronúcleos e

mutações em pelo estaminal em nosso estudo, mas foram moldados pelo tráfego de veículos e dispersão de poluente (Teixeira; Barbério, 2012; Soares et al., 2023).

Outro fator relevante é que os pontos de estudo estão localizados em uma região cercada por pequenas fábricas de cerâmica, onde a deposição de metais pesados e material particulado pode influenciar a geração de micronúcleos, especialmente devido à presença de cádmio (Cd) e cromo (Cr) (Campos et al., 2016). Além disso, a atmosfera da região fica suscetível a carbono de fuligem, carbono orgânico, cinzas inorgânicas e elementos como bário (Ba), zinco (Zn), alumínio (Al), potássio (K), cálcio (Ca), sódio (Na) e ferro (Fe) (Silva et al., 2019).

Diante dessa preocupação com a qualidade do ar e seus impactos ambientais e biológicos, diversas agências regulatórias estabelecem limites aceitáveis para poluentes atmosféricos. A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda o monitoramento anual e diário de dióxido de nitrogênio (NO_2, $\mu g/m^3$), dióxido de enxofre (SO_2, $\mu g/m^3$), monóxido de carbono (CO, mg/m^3), $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$), PM_{10} ($\mu g/m^3$) e ozônio (O_3, $\mu g/m^3$), sendo este último monitorado a cada 8 horas (OMS, 2021).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio da Resolução nº 506 de 2024 ainda inclui o monitoramento de fumaça (FMC), Partículas Totais em Suspensão (PTS) e chumbo (Pb), além de instituir um cálculo para o índice de avaliação da qualidade do ar e se organizar em metas de diminuições temporárias por anos a partir de 2024 (Brasil, 2024).

No presente estudo, os níveis de O_3, $PM_{2,5}$ e PM_{10} permaneceram dentro dos limites estipulados. No entanto, tanto o O_3 quanto o PM_{10} apresentaram correlação com a geração de micronúcleos. Castro e Sisenando (2017) também identificaram uma correlação entre PM_{10} e a formação de micronúcleos em uma das regiões analisadas no Rio de Janeiro. Entretanto, em relação ao O_3, não foi observada significância estatística, e a correlação foi negativa (Castro; Sisenando, 2017)

Embora, no presente estudo, não tenha sido observada uma correlação estatisticamente significativa com $PM_{2,5}$ e PM_{10}, as mutações em pelo estaminal podem estar positivamente associadas ao material particulado transportado pelo ar e até mesmo por contaminação do solo por óleo diesel. Essa correlação tende a ser mais evidente durante o outono e a primavera, períodos em

que os níveis de poluentes aumentam consideravelmente (Rodrigues; Mercuri; Noe, 2023; Rodrigues et al., 2024).

As nuvens também desempenham um papel importante na resposta aos poluentes. Embora essa relação ainda seja pouco explorada, a literatura indica que a nebulosidade ou ampla cobertura de nuvens está associada a níveis elevados de poluição do ar por óxido de enxofre (SO), NO e SO_2, sendo o outono a estação mais poluída do ano (Valjarević, 2024).

Além disso, a menor ventilação em áreas urbanas de cidades do interior, em comparação às regiões costeiras, contribui para a concentração de poluentes e a formação de ilhas de calor. Esse efeito é especialmente relevante em eventos de calor extremo e poluição por ozônio (Huang et al., 2023).

Entretanto, ao correlacionar a velocidade do vento com os níveis de O_3, nosso estudo identificou uma relação positiva, explicada pelo comportamento das ilhas de calor. Essas ilhas promovem um desbalanço térmico local, que favorece a geração de ozônio e induz a formação de ventos de maneira difusa, porém desigual, resultando em tendências de acumulação em determinadas áreas (Haoyuan, Xingtao & Zeng, 2023).

Esses achados reforçam a importância de medidas para minimizar as vias de geração direta e indireta de poluentes atmosféricos, considerando também as características climáticas e do relevo. Isso se torna especialmente relevante diante dos impactos diretos na saúde pública, uma vez que a degradação da qualidade do ar está associada ao aumento de diversas patologias, incluindo câncer de mama e de pulmão (Holloway et al., 2021; OMS, 2024; Leliveld et al., 2023; Luo et al., 2025; Gabet et al., 2021).

Dentre as principais estratégias de mitigação, destaca-se a criação e/ou ampliação de áreas verdes, considerando sua capacidade de reduzir os efeitos de gases poluentes com potencial mutagênico. Esse efeito foi confirmado por Rocha e Mussury (2020), que observaram uma redução na geração de micronúcleos mesmo em áreas com elevado tráfego de veículos. Esses achados são consistentes e evidenciam que, além de funcionarem como sequestrantes de poluentes ambientais, as áreas verdes refletem avanços no desenvolvimento social e econômico (Trinh; Cicea, 2021).

Entre as limitações deste estudo, destaca-se a complexidade dos testes, sua execução laboriosa e a falta de acesso a equipamentos que permitam estudar os poluentes e suas

características físicas e químicas. Embora sejam técnicas simples e de baixo custo, podem ser influenciadas por diversos fatores internos e externos ao analista, exigindo monitoramento rigoroso para minimizar possíveis vieses.

Além disso, há desafios inerentes à própria amostra coletada, como a rápida degradação das inflorescências utilizadas em TRAD-SH se não acondicionada corretamente, o que pode impedir a contagem devido à retração dos pelos. Da mesma forma, os botões florais, apesar da diversidade no desenvolvimento celular, nem sempre apresentam tétrades, o que pode limitar a análise.

Ainda assim, os resultados deste estudo contribuem para pesquisas que utilizam a técnica TRAD-SH, menos comum do que TRAD-MCN, e abrem caminhos para novas investigações. Além de seu caráter pioneiro na região e no estado, este estudo permite uma melhor compreensão dos efeitos do desenvolvimento industrial de Guaiúba, associado ao PQG, e de Redenção, onde a UPMA foi estabelecida como ponto de análise.

Trabalhos futuros podem explorar novos pontos de estudo e/ou correlacionar seus achados com os dados apresentados neste artigo. Além disso, recomenda-se a investigação de outros poluentes atmosféricos, como CO, SO_2 e NO_2, bem como a análise do bioacúmulo de metais pesados, elementos reativos e microplásticos, ampliando o escopo da pesquisa sobre os impactos ambientais e seus desdobramentos na saúde pública.

CONCLUSÃO

Com ênfase na análise da qualidade do ar do Polo Químico de Guaiúba os resultados obtidos demonstram que tanto o PQG quanto o ponto UPMA apresentam impacto ambiental na qualidade do ar. A maior frequência de micronúcleos e mutações em pelo estaminal foi registrada no UPMA sugerindo que esse local pode estar sujeito a uma maior exposição a agentes poluentes. No entanto, a ausência de diferença estatisticamente significativa entre os pontos de amostragem indica que ambos os pontos podem estar sendo afetados por fatores ambientais e climáticos similares conforme sugerido, parcialmente, pela hipótese nula da pesquisa.

Os bioensaios com *Tradescantia pallida* (Rose) D.R Hunt var. *purpurea* (Commelinaceae) evidenciaram alterações genotóxicas associadas a poluentes atmosféricos, especialmente com

PM_{10} e ozônio. As correlações estabelecidas com variáveis climáticas, como umidade e velocidade do vento, reforçam a influência desses fatores na dispersão e concentração dos poluentes, podendo contribuir para variações na frequência de eventos genotóxicos observados ao longo do período de estudo.

A presença de indústrias químicas, tráfego de veículos pesados e atividades de mineração na região pode estar diretamente relacionada às emissões de poluentes que afetam a qualidade do ar e a saúde ambiental. Dessa forma, o monitoramento contínuo da qualidade do ar e a adoção de medidas para minimizar a poluição atmosférica são fundamentais para mitigar os impactos ambientais e potenciais riscos à saúde humana.

Diante desses achados, recomenda-se a implementação de políticas ambientais mais rigorosas, incluindo o controle das emissões industriais e o incentivo à ampliação de áreas verdes, que auxiliam na absorção de poluentes.

REFERÊNCIAS

BLANK, Lars Mathias et al. Biotechnological upcycling of plastic waste and other non-conventional feedstocks in a circular economy. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 62, p. 212-219, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166919301272. Acesso em: 01 abr. 2025.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 506, de 05 de julho de 2024**. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827. Acesso em: 04 abr. 2025.

CAMPOS JÚNIOR, Edimar Olegário et al. Novelties on tradescantia: Perspectives on water quality monitoring. **Chemosphere**, v. 368, p. 143732, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653524026328. Acesso em: 01 abr. 2025.

CAMPOS, Carlos Fernando et al. Assessment of genotoxicity of air pollution in urban areas using an integrated model of passive biomonitoring. **Environmental Pollution**, v. 355, p. 124219, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749124009333. Acesso em: 02 mar. 2025.

CAMPOS, Carlos Fernando et al. Biomonitoring of the environmental genotoxic potential of emissions from a complex of ceramic industries in Monte Carmelo, Minas Gerais, Brazil, using

Tradescantia pallida. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A**, v. 79, n. 3, p. 123-128, 2016. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15287394.2015.1118714. Acesso em: 26 mar. 2025.

CARVALHO-OLIVEIRA, R. et al. Diesel emissions significantly influence composition and mutagenicity of ambient particles: a case study in São Paulo, Brazil. **Environmental Research**, v. 98, n. 1, p. 1-7, 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935104000891. Acesso em: 02 abr. 2025.

CASTRO, Letícia F.; SISENANDO, Herbert A. Monitoramento da qualidade do ar por meio do ensaio com Tradescantia pallida na cidade do Rio de Janeiro/Brasil. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, v. 10, n. 3, 2017. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/material3os/2017_Castro_etal_TradescantiaPallida_RITRAS_DE3os.pdf. Acesso em: 02 abr. 2025.

CEARÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Mudança Climática. **Área de Proteção Ambiental da Serra de Baturité.** Ceará: Fortaleza. 2010. Disponível em: https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/08/apa-da-serra-de-baturite/. Acesso em: 26 abr. 2025.

CHIQUETTO, Júlio Barboza et al. Impact of a truck Driver's strike on air pollution levels in São Paulo. **Atmospheric Environment**, v. 246, p. 118072, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020308049?casa_token=mk98twuEnMAAAAAA:4HAReJEKKzve-aRpAbFKbFmfeZzPxhIKvxYv-a-hCz9wUeGuieDWR-B5-uYwusqUO66of-fL. Acesso em: 02 abr. 2025.

COHEN, Jacob. Quantitative methods in psychology: A power primer. **Psychol. Bull.**, v. 112, p. 1155-1159, 1992. Disponível em: https://psycnet.apa.org/record/1992-37683-001. Acesso em: 26 mar. 2025.

FUGIEL, Agata et al. Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sectors of European countries. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 159-168, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616322004. Acesso em: 26 mar. 2025.

GABET, Stephan et al. Breast cancer risk in association with atmospheric pollution exposure: a meta-analysis of effect estimates followed by a health impact assessment. **Environmental health perspectives**, v. 129, n. 5, p. 057012, 2021. Disponível em: https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/EHP8419. Acesso em: 01 abr. 2025.

GIORDANO, Simonetta; SPAGNUOLO, Valeria; CAPOZZI, Fiore. Biomonitoring of air pollution. **Atmosphere**, v. 12, n. 4, p. 433, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/12/4/433. Acesso em: 02 abr. 2025.

Rumsey DJ. Statistics For Dummies. John Wiley & Sons, 2016.

GIOVANNINI, Lorenzo et al. Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: Challenges and needs for improving air quality measurements and modeling. **Atmosphere**, v. 11, n. 6, p. 646, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/11/6/646. Acesso em: 04 abr. 2025.

GODOI, Kaline de Souza Pereira et al. Mutagenicity in Tradescantia pallida as an Indicator of the Effect of Air Pollution and Human Health. **Atmosphere**, v. 12, n. 9, p. 1185, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/12/9/1185. Acesso em: 02 abr. 2025.

GUPTA, Shivali et al. Atmospheric microplastics: Perspectives on origin, abundances, ecological and health risks. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 49, p. 107435-107464, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-28422-y?fromPaywallRec=false. Acesso em: 01 abr. 2025.

HOLLOWAY, Tracey et al. Satellite monitoring for air quality and health. **Annual review of biomedical data science**, v. 4, n. 1, p. 417-447, 2021. Disponível em: https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-biodatasci-110920-093120. Acesso em: 04 abr. 2025.

HUANG, Ziwei et al. Different characteristics of independent and compound extreme heat and ozone pollution events in the Greater Bay Area of China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 124, p. 103508, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843223003321#bi005. Acesso em: 01 abr. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Portal Cidades (Redenção e Guaiúba). 2025. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce. Acesso em: 26 mar. 2025.

KHOSROVYAN, Alla et al. Assessment of the mutagenic potential of the water of an urban river by means of two Tradescantia-based test systems. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 876, p. 503449, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383571822000109?casa_token=QJUaNA72cjkAAAAA:JSff7aEWZk4B-KWZ-gfjF_INRCnlYAMn78s9YyuWnHOAqU_1lJe1hOcjWlCrETNFlfjxY-vB. Acesso em: 02 abr. 2025.

KIM, Jin Kyu et al. Genotoxic effects of volatile organic compounds in a chemical factory as evaluated by the Tradescantia micronucleus assay and by chemical analysis. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 541, n. 1-2, p. 55-61, 2003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383571803001839. Acesso em: 04 abr. 2025

LELIEVELD, Jos et al. Air pollution deaths attributable to fossil fuels: observational and modelling study. **bmj**, v. 383, 2023. Disponível em: https://www.bmj.com/content/383/bmj-2023-077784.abstract. Acesso em: 04 abr. 2024.

LUO, Ganfeng et al. Estimated worldwide variation and trends in incidence of lung cancer by histological subtype in 2022 and over time: a population-based study. **The Lancet Respiratory Medicine**, 2025. Disponível em: https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600(24)00428-4/abstract. Acesso em: 04 abr. 2025.

MA, T.- H. et al. Tradescantia stamen hair mutation bioassay. **Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, v. 310, n. 2, p. 211-220, 1994. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0027510794901147. Acesso em: 26 mar. 2025.

MA, Te-Hsiu; SPARROW, Arnold H.; NAUMAN, Lloyd A. Schairer Anne F. Effect of 1, 2-dibromoethane (DBE) on meiotic chromosomes of Tradescantia. **Mutation Research/Genetic Toxicology**, v. 58, n. 2-3, p. 251-258, 1978. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0165121878900162. Acesso em: 01 abr. 2025.

MACIEJCZYK, Polina; CHEN, Lung-Chi; THURSTON, George. The role of fossil fuel combustion metals in PM2. 5 air pollution health associations. **Atmosphere**, v. 12, n. 9, p. 1086, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/12/9/1086. Acesso em: 26 mar. 2025.

MOLINA, Lázaro; SEGURA, Ana. Biochemical and metabolic plant responses toward polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals present in atmospheric pollution. **Plants**, v. 10, n. 11, p. 2305, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/11/2305. Acesso em: 01 abr. 2025.

Organização Mundial da Saúde – OMS. **Ambient (outdoor) air pollution.** Geneva: Organização Mundial da Saúde, 2024. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health. Acesso em: 02 abr. 2025.

Organização Mundial da Saúde – OMS. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: Organização Mundial da Saúde, 2021. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228. Acesso em: 02 abr. 2025.

Organização Mundial da Saúde – OMS. **WHO trains health workers to battle air pollution and protect global health.** Geneva: Organização Mundial da Saúde, 2023. Disponível em: https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/air-pollution--the-invisible-health-threat. Acesso em: 02 abr. 2025.

PARRA, Rene et al. Influence on Air Quality of Moving From Diesel to Electric Buses: The Case of the City of Cuenca, Ecuador. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 262, p. 669-681, 2024. Disponível em: https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/262/38621. Acesso em: 04 mar. 2025.

PATTI, Antonella; ACIERNO, Domenico. Towards the sustainability of the plastic industry through biopolymers: properties and potential applications to the textiles world. **Polymers**, v. 14, n. 4, p. 692, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4360/14/4/692. Acesso em: 01 abr. 2025.

PENG, Xing et al. Influence of quarry mining dust on PM2. 5 in a city adjacent to a limestone quarry: seasonal characteristics and source contributions. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 940-949, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716301917?casa_token=ircwZUrTL2oAAAAA:VevRPRIobchgRj6TYXDqCMczA6bQbSV8MGmK13E22UwQgoQKoIMkfqtqapcq4AgH0eOQgtMG. Acesso em: 02 abr. 2025.

ROCHA, Aline; MUSSURY, Rosilda Mara. Green areas in an urban environment minimize the mutagenic effects of polluting gases. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 12, p. 574, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-04929-9. Acesso em: 04 abr. 2025.

RODRIGUES, Geraldo Stachetti. Bioensaios de toxicidade genética com Tradescantia. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1051547. Acesso em: 26 mar. 2025.

RODRIGUES, Leatrice Talita et al. Tradescantia response to air and soil pollution, stamen hair cells dataset and ANN color classification. **Frontiers in Big Data**, v. 7, p. 1384240, 2024. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/big-data/articles/10.3389/fdata.2024.1384240/full. Acesso em: 01 abr. 2025.

RODRIGUES, Leatrice Talita; MERCURI, Emílio Graciliano Ferreira; NOE, Steffen Manfred. Air pollution monitoring with Tradescantia hybrid and optical sensors in Curitiba and Araucária, Brazil. **Forestry Studies**, v. 78, n. 1, p. 57-71, 2023. Disponível em: https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/fsmu-2023-0005. Acesso em: 01 abr. 2025.

SAMAD, Abdul et al. Meteorological and air quality measurements in a city region with complex terrain: influence of meteorological phenomena on urban climate. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 32, n. 4, p. 293-315, 2023. Disponível em: https://elib.dlr.de/197333/. Acesso em: 02 abr. 2025.

SCHNEIDER, Jaíne et al. Avaliação da genotoxicidade de poluentes atmosféricos relacionados ao trânsito veicular por meio de biomonitoramento com Tradescantia pallida var. purpurea. **Scientia Plena**, v. 20, n. 3, 2024. Disponível em: https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/7175/2683. Acesso em: 02 abr. 2025.

SHI, Haoyuan; SONG, Xingtao; ZENG, Shenglan. Impact of the urban heat island effect on ozone pollution in chengdu city, China. **Chinese Geographical Science**, v. 33, n. 6, p. 1017-1032, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11769-023-1391-8. Acesso em: 01 abr. 2025.

SILVA, Kamilla Karla et al. Physico-chemical properties and genotoxic effects of air particulate matter collected from a complex of ceramic industries. **Atmospheric Pollution Research**, v. 10, n. 2, p. 597-607, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104218304562?casa_token=qVs0S0cAzEEAAAAA:p8K7i0Q89usuY7DeZwjs_M9b9-5buYLhM_ynq7CrGLgjjIcFvmft8HTcSEgVUVQaWdvAXGnT. Acesso em: 04 abr. 2025.

SILVEIRA, A. C.; BASTOS, F. H.; MEIRA, Suedio Alves. Inventário e avaliação quantitativa do patrimônio geomorfológico do maciço de Baturité (CE). **Revista Caminhos de Geografia**, v. 24, n. 93, p. 132-152, 2023. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/65269. Acesso em: 04 abr. 2025.

ŠIUKŠTA, Raimondas et al. Response of Tradescantia plants to oxidative stress induced by heavy metal pollution of soils from industrial areas. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 44-61, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-018-3224-3. Acesso em: 26 mar. 2025.

SOARES, Talita Daiane Bernardo et al. Evaluation the urban atmospheric conditions using micronuclei assay and stomatal index in Tradescantia pallida. **Atmosphere**, v. 14, n. 6, p. 984, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/14/6/984. Acesso em: 03 abr. 2024.

SUYAMA, F. et al. Pollen mother cells of Tradescantia clone 4430 and Tradescantia pallida var. purpurea are equally sensitive to the clastogenic effects of X-rays. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 35, p. 127-129, 2002. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bjmbr/a/wt97s9kBxbDCCZNpJJLWMnN/?lang=en. Acesso em: 01 abr. 2025.

TEIXEIRA, Mateus Cabral Vasconcellos; BARBÉRIO, Agnes. Biomonitoramento do ar com Tradescantia pallida (Rose) DR Hunt var purpurea Boom (Commelinaceae). **Revista Ambiente & Água**, v. 7, p. 279-292, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/yXwTz9k4RbqNWBCRy36Xpys/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 02 abr. 2025.

TRINH, Nguyen Thi Hoai; CICEA, Claudiu. Green space and its role to improve social and economic development for a better quality of life. **Management and Economics Review**, v. 1, p. 49-60, 2021. Disponível em: https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=955829. Acesso em: 04 abr. 2025.

VALJAREVIĆ, Aleksandar. Long-term remote sensing-based methods for monitoring air pollution and cloud cover in the Balkan countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 18, p. 27155-27171, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-32982-y. Acesso em: 01 abr. 2025.

XING, Qiaofeng; SUN, Meiping. Characteristics of PM2.5 and PM10 spatio-temporal distribution and influencing meteorological conditions in Beijing. **Atmosphere**, v. 13, n. 7, p. 1120, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/13/7/1120. Acesso em: 01 abr. 2025.

ZEVALLOS, Delia M.; SKALDINA, Oksana; BLANDE, James D. Effects of Atmospheric Pollutants on Volatile-Mediated Insect Ecosystem Services. **Global Change Biology**, v. 31, n. 1, p. e70034, 2025. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.70034. Acesso em: 01 abr. 2025.