



Avaliação da genotoxicidade de poluentes atmosféricos relacionados ao trânsito veicular por meio de biomonitoramento com *Tradescantia pallida* var. *purpurea*

Evaluation of the genotoxicity of vehicular traffic-related atmospheric pollutants through biomonitoring with *Tradescantia pallida* var. *purpurea*

J. Schneider¹; N. C. P. Bione¹; J. Sieklicki¹; P. P. G. de Oliveira^{2*}; P. C. de Oliveira Filho¹; R. Delgado-Martínez³

¹Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, 84505-677, Irati-Paraná, Brasil

²Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas do Vale do São Lourenço, 78820-000, Jaciara-Mato Grosso, Brasil

³Departamento de Agronomia, Universidad Autónoma de Tamaulipas, 87000, Ciudad Victoria-Tamaulipas, México

* pedropaulo_@hotmail.com

(Recebido em 05 de maio de 2023; aceito em 19 de março de 2024)

Áreas de tráfego intenso geram compostos complexos de poluentes com diferentes características físico-químicas e toxicidades e algumas plantas são frequentemente utilizadas como bioindicadores da qualidade do ar, devido à sua sensibilidade e capacidade de acumular substâncias nocivas. Neste cenário, o ensaio Trad-MCN tem se mostrado confiável para avaliar a genotoxicidade resultante da poluição do ar. Esse estudo teve como objetivo avaliar o efeito genotóxico causado por poluentes atmosféricos relacionados ao tráfego de veículos em diferentes setores da cidade de Irati, Paraná, Brasil, através de análises da microsporogênese de *Tradescantia pallida* var. *purpurea*. Foram realizadas três coletas de botões florais em diferentes estágios de maturação em sete localidades com três níveis de tráfego de veículos, sendo: alta (caminhões, ônibus de transporte urbano e carros particulares), moderado (carros particulares e ônibus de transporte urbano) e Baixa (principalmente carros particulares). Foram analisadas 50 células em cada fase da meiose em cada inflorescência, totalizando cinco inflorescências e 500 tétrades em cada local. O resultado das análises citológicas mostrou anormalidades em todas as fases da meiose com ênfase nas metáfases e anáfases tanto na meiose I quanto na meiose II em todos os pontos analisados. Dentre as anormalidades encontradas, destacam-se, cromossomos bivalentes não organizados na placa metafásica, segregação irregular de cromossomos, aderências e pontes anafásicas. Tais anormalidades, formaram tétrades de micrósporos com micronúcleos, onde a região com maior fluxo veicular apresentou maior frequência de anormalidades meióticas, com 30,4% do número total de células analisadas, mostrando que esta região apresenta maior emissão de poluentes potencialmente genotóxicos.

Palavras-chave: biomonitoramento, qualidade ambiental, Trad-MCN.

Intense traffic areas generate complex compounds of pollutants with different physical-chemical characteristics and toxicities, and some plants are often used as bioindicators of air quality, due to their sensitivity and ability to accumulate harmful substances. In this scenario, the Trad-MCN assay has proven to be reliable for assessing genotoxicity resulting from air pollution. This study aimed to evaluate the genotoxic effect caused by air pollutants related to vehicle traffic in different sectors of the city of Irati, Paraná, Brazil, using *Tradescantia pallida* var. *purpurea* microsporogenesis analysis. Three collections of floral buds were made in seven locations with three levels of traffic: high (trucks, urban transport buses, and private cars), moderate (private cars and urban transport buses), and low (mostly private cars). Cytological analysis showed abnormalities in all phases of meiosis, especially in metaphases and anaphases, in all analyzed points. The abnormalities found included unorganized bivalent chromosomes, irregular chromosome segregation, adhesions, and anaphase bridges, forming tetrads of microspores with micronuclei. The region with the highest vehicular traffic presented a higher frequency of meiotic abnormalities, with 30.4% of the total number of analyzed cells, indicating higher emission of potentially genotoxic pollutants in this region.

Keywords: biomonitoring, environmental quality, Trad-MCN.

1. INTRODUÇÃO

A crescente emissão de poluentes no ar atmosférico é uma preocupação global, dada sua repercussão negativa no meio ambiente e na saúde humana [1]. Acentuada pelo crescimento urbano-industrial e pelo aumento exponencial de veículos nas últimas décadas, a deterioração da qualidade do ar tem impactos significativos [2-4]. Áreas com intenso tráfego veicular acumulam complexos poluentes, expondo regiões residenciais vizinhas a níveis elevados de substâncias nocivas [5, 6], resultando em maior suscetibilidade a danos genotóxicos [7].

O uso de plantas como bioindicadores para avaliar os efeitos tóxicos e genotóxicos do ambiente poluído destaca-se pela sensibilidade desses organismos e sua capacidade de acumular substâncias prejudiciais [8]. No contexto da avaliação qualitativa e quantitativa da contaminação ambiental, os efeitos de compostos genotóxicos em plantas têm sido cruciais [3]. Um bioensaio notável é o de micronúcleo *Tradescantia* ssp. (Trad-MCN) [9], que avalia a genotoxicidade induzida pela contaminação do ar em áreas urbanas, fundamentando-se na formação de micronúcleos resultantes da quebra cromossômica durante a meiose das células-mãe do grão de pólen de inflorescências de *Tradescantia* ssp. [10].

Adicionalmente, ao considerar a saúde pública, é vital ressaltar a relevância desses estudos para a compreensão dos riscos associados à poluição atmosférica. Segundo a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (International Agency for Research on Cancer – IARC), vinculada à Organização Mundial da Saúde (OMS), a exposição à poluição do ar e ao material particulado presente no ambiente externo é considerada carcinogênica para humanos, sendo reclassificada do Grupo 2 para o Grupo 1. Esta reclassificação é respaldada por um aumento do risco de câncer de pulmão associado ao aumento dos níveis desses poluentes, evidenciando a ampla aplicabilidade dessas conclusões a todas as regiões do mundo [11].

Estudos conduzidos no Canadá e nos EUA, que avaliaram a incidência de câncer de pulmão relacionando a distância da residência com a via de tráfego, encontraram resultados significativos [12, 13]. Essas descobertas, apesar de enfatizarem os riscos à saúde humana, ressaltam que a mutagênese em plantas, como avaliada pelo bioensaio TradMCN, pode ser uma ferramenta útil para compreender o risco humano, mesmo que não possam ser diretamente equiparados [14].

O uso do bioensaio de micronúcleo *Tradescantia* (Trad-MCN) não só contribui para uma compreensão mais profunda dos efeitos da poluição do ar nas plantas, mas também destaca sua importância em estudos epidemiológicos que buscam entender a relação entre a poluição do ar e a saúde humana [15]. Assim, testes utilizando plantas como bioindicadores torna-se uma ferramenta valiosa na avaliação da genotoxicidade ambiental e podem ajudar a monitorar a qualidade do ar e avaliar possíveis riscos genotóxicos para humanos [16].

Desta forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito genotóxico causado por poluentes atmosféricos relacionados ao trânsito veicular em diferentes setores do município de Irati, Paraná, Brasil, através da análise detalhada da microsporogênese de *Tradescantia pallida* var. *purpurea*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do local de estudo

O estudo foi conduzido no município de Irati, localizado na região Sudeste do Estado do Paraná, entre as coordenadas 25°28'38,62"S e 50°38'56,44"O. Irati possui uma população estimada de 61.439 habitantes distribuídos por 999.517 km², resultando em uma densidade populacional de 61,47 hab/km² [17]. Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta um clima predominantemente Cfb subtropical úmido (temperado úmido) [18]. A umidade relativa média anual é de 78,3%, com temperatura média anual de 18,0°C e precipitação média anual de 1.430 mm. A altitude máxima do município é de 817 m. De acordo com o Ministério da Infraestrutura (2022) [19] Irati possui uma frota de 42.392 veículos automotores, dividido entre distribuídos da seguinte forma: automóvel (25.586); caminhão (2.438); caminhonete e camioneta (6.052); veículos de duas e três rodas (7.538); micro-ônibus e ônibus

(340) utilitário (421) trator de rodas e outros (17). A região urbana de Irati não possui um parque industrial complexo, sendo as principais fontes de poluição atmosférica as indústrias que utilizam derivados de madeira como combustível. Além disso, destaca-se a poluição gerada pelo tráfego de veículos leves (automóveis de passeio) e pesados (ônibus e caminhões), sendo relevante ressaltar que as emissões de poluentes atmosféricos podem variar de acordo com o tipo de veículo e o combustível utilizado.

2.2 Coleta de dados

2.2.1 Pontos de estudo e coleta de material

Para a execução deste trabalho, utilizou-se o método de biomonitoramento passivo, empregando plantas existentes na área de estudo. Amostras de *Tradescantia pallida* var. *purpurea* foram selecionadas em sete localidades da cidade de Irati - PR, cada uma apresentando diferentes níveis de tráfego de veículos. Os pontos de estudo foram categorizados da seguinte forma: Alta Intensidade de Tráfego: Inclui caminhões, ônibus de transporte urbano e carros particulares (locais: P5, P6 e P7); Moderada Intensidade de Tráfego: Composta por carros particulares e ônibus de transporte urbano (locais: P1, P2 e P4); Baixa Intensidade de Tráfego: Caracterizada por tráfego veicular escasso, principalmente de carros particulares (local: P3), conforme observado na Figura 1. Foram realizadas três coletas de inflorescências em cada local, nos meses de agosto e dezembro de 2017 e março de 2018.

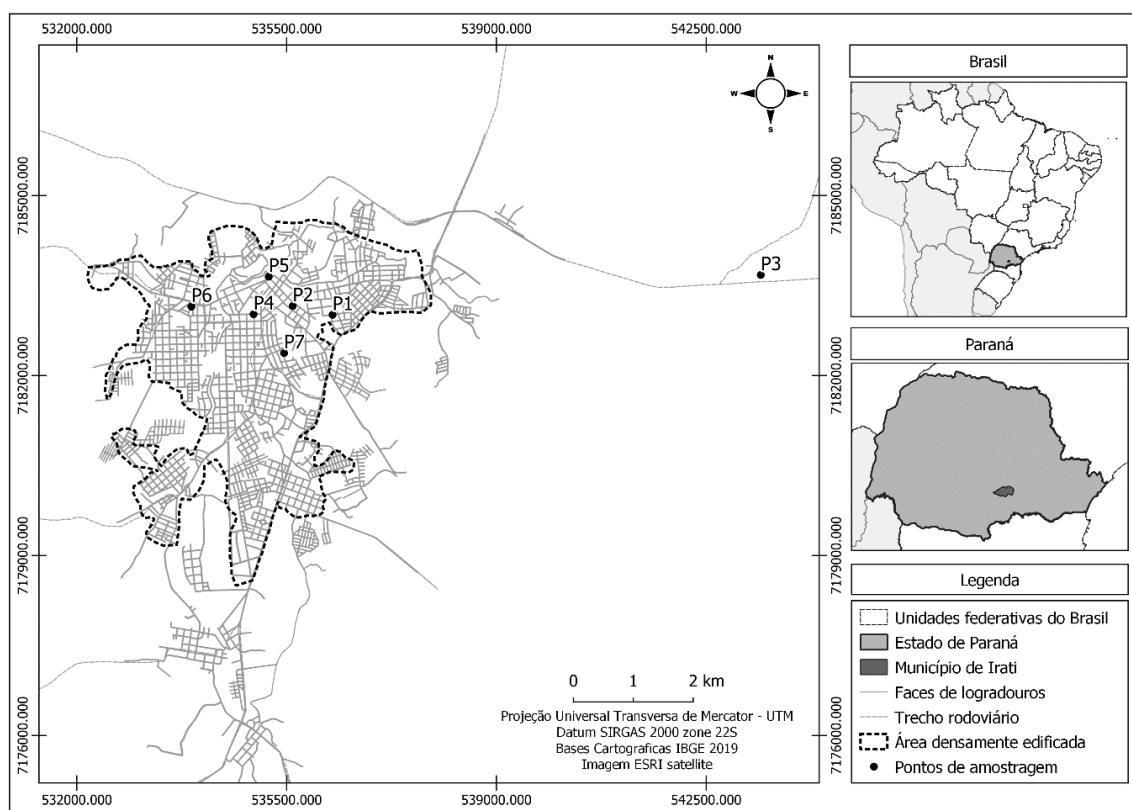


Figura 1: Locais de exposição e amostragem de *Tradescantia pallida* var. *purpurea* para realizar biomonitoramento passivo no município de Irati – PR.

2.2.1.1 Caracterização dos pontos amostrados

O P1, está situado em uma zona residencial, caracterizada por sua abundância de vegetação e proximidade a áreas verdes. Em contraste, o P2, encontra-se em uma zona residencial no centro

da cidade, desprovida de árvores, mas cercada por restaurantes e lojas. Já o P3, está localizado em uma zona rural, onde a presença de pastagens é notável, e encontra-se a próximo de um restaurante. O P4, está em uma zona residencial sem árvores, perto de um cemitério, mas também a uma curta distância de um supermercado, escola e igreja. O P5, também situado em uma área residencial sem árvores, destaca-se pela proximidade a uma escola, uma serraria e um estádio de futebol. Quanto ao P6, apresenta uma configuração única, pois está situado debaixo de uma árvore em uma zona residencial, a uma distância curta de uma área verde, um posto de combustível e áreas comerciais. Por fim, o P7 encontra-se próximo a uma árvore, em uma zona residencial arborizada, e mantém proximidade com áreas verdes.

2.2.2 Procedimentos de amostragem

Para as análises da microsporogênese, foram coletadas aleatoriamente cinco inflorescências de *Tradescantia pallida* var. *purpúrea* de cada ponto amostral. As inflorescências foram fixadas em solução de Carnoy 3:1 (álcool: ácido acético v/v), por um período de 24 horas à temperatura ambiente. Posteriormente, as amostras foram transferidas para frascos contendo álcool 70% e armazenadas sob refrigeração. No processo de preparo das lâminas, as inflorescências foram dissecadas, e as anteras de diferentes flores, por inflorescência, foram submetidas a técnica convencional de esmagamento com a utilização de carmim propiônico (1%) como corante. Para cada ponto amostral, foram confeccionadas cinco lâminas citológicas contendo material de cada uma das cinco inflorescências coletadas por ponto. A análise envolveu 50 células de cada fase da Meiose I e II, e a frequência de micronúcleos foi calculada pela observação de 500 tétrades por lâmina. As imagens dos microsporócitos e das tétrades de micrósporos foram capturadas com o uso de um fotomicroscópio óptico Olympus CX31, equipado com oculares de 10x e objetiva de 40x, totalizando um aumento final de 400x, e uma câmera fotográfica digital.

2.2.3 Avaliação do fluxo veicular

O fluxo veicular foi obtido a partir da contagem dos veículos que circularam pelo ponto de coleta durante quatro dias de amostragem, três vezes ao dia, das 7h às 8h, das 11h às 12h e das 17h às 18h, posteriormente foi calculada a média de fluxo veicular. Este procedimento foi realizado seguindo a metodologia do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DENIT (2006) [20].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o percentual de anormalidades meióticas encontradas em cada ponto analisados. Observou-se que as fases mais afetadas foram as metáfases e anáfases I e II.

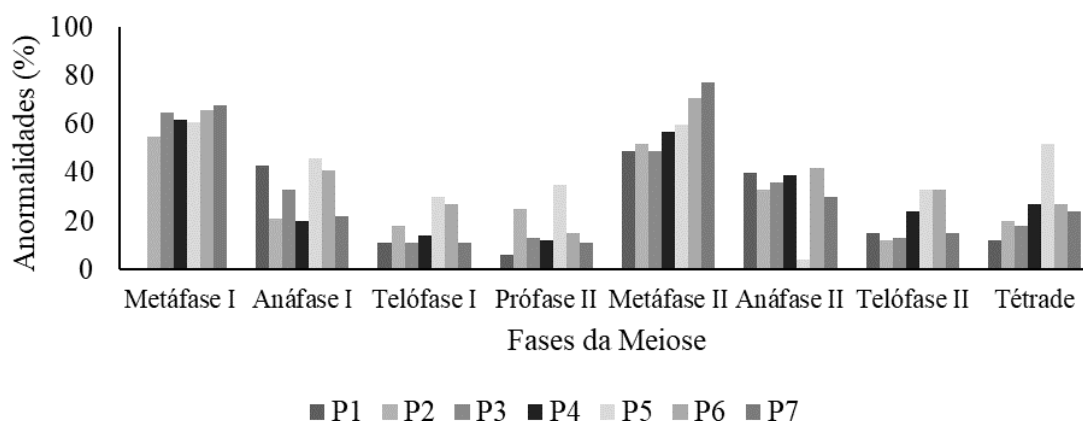


Figura 2: Frequência de anormalidades das fases da meiose I e meiose II em cada ponto.

Durante as análises citológicas, diversas anormalidades foram identificadas, incluindo metáfases I com um a quatro pares de cromossomos não orientados na placa equatorial da célula (Figura 3a e 3b), aderência e cromossomos em migração precoce para os polos (Figura 3c). Na meiose II, foram observadas metáfases assíncronas (Figura 4a) e com cromossomos em segregação precoce (Figura 4b). Em relação à segregação dos cromossomos para os polos, foram encontradas anáfases I com cromossomos retardatários (Figura 3d), pontes cromossômicas (Figura 3e) e micronúcleos (Figura 3f), assim como prófases II com micronúcleos (Figura 3i). Tucker e Preston (1996) [21] afirmam que diferentes mecanismos podem estar envolvidos na formação dos micronúcleos, incluindo quebras cromossômicas (clastogênese) e aneuploidia decorrente da inibição da formação do fuso mitótico. Cromossomos retardatários (Figura 4e), pontes cromossômicas (Figura 4d) também foram observados em anáfases II, além de assincronia (Figura 4c). Todas essas anormalidades segregacionais resultaram na formação de telófases I e II com micronúcleos (Figuras 3h e 4g) e pontes cromossômicas (Figuras 3g e 4f), o que favoreceu a formação de tetrades de micrósporos com tamanhos e números variados de micronúcleos (Figuras 4h e 4i).

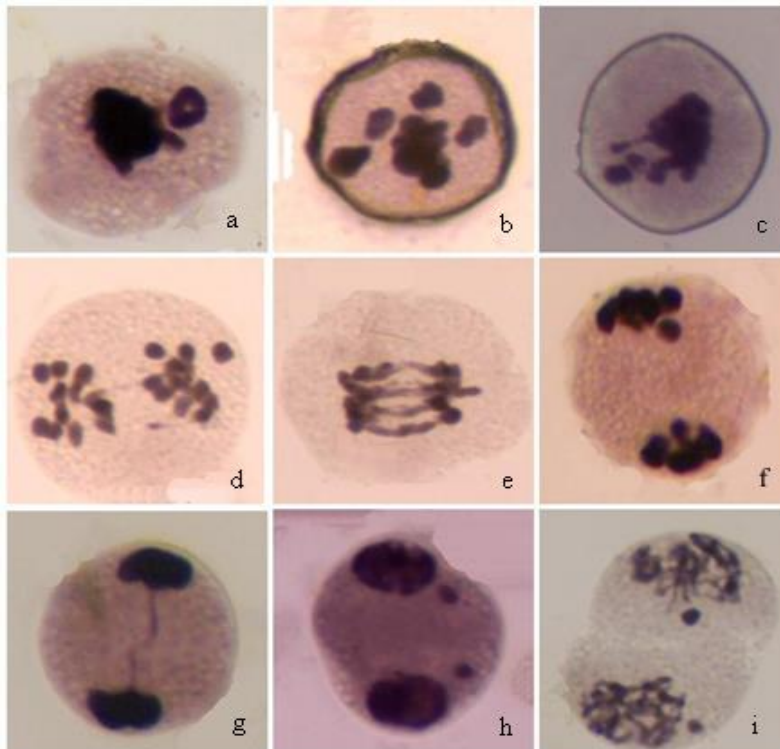


Figura 3: Aspectos citológicos da meiose I e prófase da meiose II. a) Metáfase I com par de cromossomos não congressados à placa equatorial. b) Metáfase I com quatro pares de cromossomos não congressados à placa. c) Metáfase I com segregação precoce e aderência. d) Anáfase I com micronúcleo e ponte cromossômica. e) Anáfase I com ponte Cromossômica. f) Anáfase I com micronúcleo. g) Telófase I com ponte cromossômica. h) Telófase I com micronúcleo. i) Prófase II com micronúcleo.

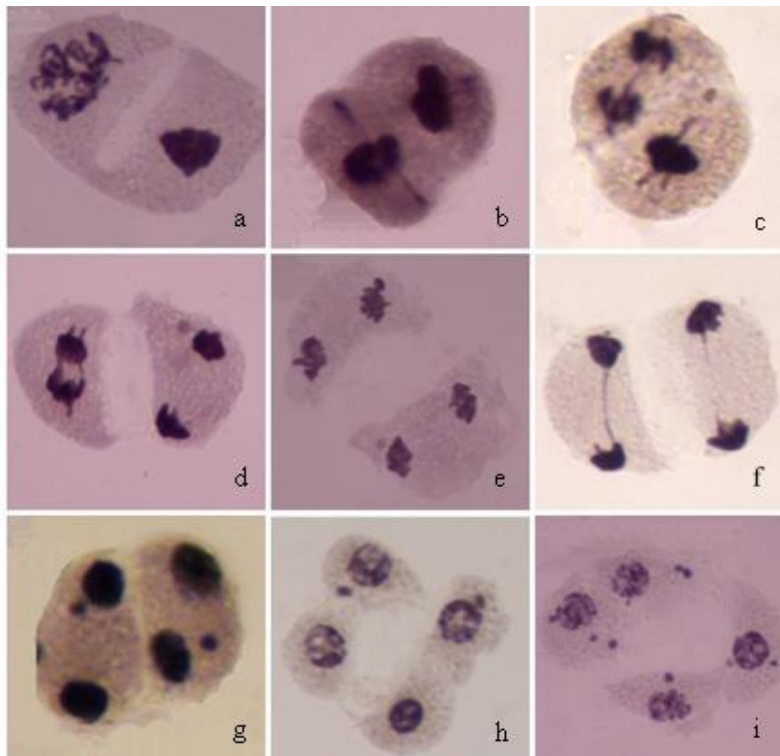


Figura 4: Aspectos citológicos da meiose II e células em fase de tetrade. a) Metáfase II assíncrona. b) Metáfase II com segregação precoce e aderência. c) Anáfase II com ponte cromossômica e assincronia. d) Anáfase II com ponte cromossômica. e) Anáfase II com micronúcleo. f) Telófase II com ponte cromossômica. g) Telófase II com micronúcleo. h) Tétrade com 50% dos micrósporos com micronúcleo. i) Tétrade com 100% dos micrósporos com micronúcleo.

As anormalidades descritas são consistentes com efeitos genotóxicos relatados em estudos anteriores [15], onde diversos poluentes atmosféricos, incluindo aqueles provenientes de veículos automotores, foram associados a alterações na dinâmica da divisão celular da *Tradescantia pallida*. Substâncias consideradas "tóxicas", como aquelas presentes em combustíveis fósseis, têm sido associadas a efeitos mutagênicos e clastogênicos [14]. Carreras et al. (2013) [22] relatam que o tráfego veicular na cidade de Córdoba, Argentina, aumentou a frequência de micronúcleos em *T. pallida*, com plantas cultivadas em áreas com tráfego intenso apresentando uma frequência de anormalidades meióticas 1,5 vezes maior do que em áreas com baixa circulação de veículos e muita vegetação. Portanto, diversos poluentes podem afetar a dinâmica da divisão celular, afetando o alinhamento dos cromossomos na placa equatorial, as fibras do fuso e a formação de quiasmas. De acordo com Adamowski et al. (2000) [23], os cromossomos que não se alinham à placa metafásica podem ser resultado de erros na ligação às fibras do fuso nos cinetócoros dos cromossomos, processo que ocorre devido à desorientação cromossômica na pró-metáfase, fase que antecede a metáfase. Os cromossomos que migram precocemente para os polos podem estar relacionados com os quiasmas, que são responsáveis pela manutenção dos bivalentes para que, na anáfase I, ocorra a segregação em condições ideais [24, 25]. A finalização tardia dos quiasmas pode resultar em anomalias, como os cromossomos retardatários em anáfase I [25].

Frequentemente, a migração precoce para os polos é encontrada juntamente com a aderência cromossômica, também conhecida como viscosidade cromossômica, que é caracterizada por um intenso agrupamento de cromossomos durante qualquer fase do ciclo celular, segundo [26]. Estudos conduzidos por Kiihl et al. (2011) [27], utilizando espécies do gênero *Passiflora*, também encontrou aderência cromossômica a partir da metáfase I. Além disso, a aderência cromossômica leva a uma separação irregular dos cromossomos em anáfases I e II. Neste estudo, a separação cromossômica incorreta e a formação de pontes resultaram na formação de fragmentos cromossômicos que posteriormente foram visualizados como micronúcleos na Telófase I, permanecendo em meiose II. A aderência cromossômica já foi relatada em plantas de diferentes

espécies [28]. Beadle (1932) [29] relatou pela primeira vez a aderência cromossômica em milho e atribuiu tal irregularidade a uma mutação causada por um gene recessivo denominado stikness (st). Identificações em diferentes espécies do gênero *Brachiaria* foram publicadas [28, 30-34]. Sugere-se que a aderência cromossômica esteja sob controle genético e possa ser controlada por pares de genes recessivos ou dominantes. Além disso, fatores ambientais, como raios X, temperatura e elementos do solo, também podem causar a aderência cromossômica [28].

As anormalidades descritas anteriormente também foram responsáveis pela formação de produtos meióticos com características como forma e tamanho diferentes em *Manihot* [35], *Paspalum* [23], *Brachiaria* [28, 36, 37], *Cephaelis ipecacuanha* [38], *Meconopsis aculeata* [39], *T. catigua*, *C. guidonea* e *C. canjerana* [40] e conforme Guerra (1988) [24] e Mendes-Bonato et al. (2001) [28] são anormalidades consideradas comuns a poliploidia. Essa compreensão das anormalidades cromossômicas em plantas é relevante não apenas para a biologia vegetal, mas também tem implicações mais amplas. Estudos epidemiológicos, como os conduzidos por Pope III et al. (2002) [41], indicam que o aumento dos níveis de poluentes atmosféricos está associado a taxas mais elevadas de doenças malignas em humanos, como o câncer de pulmão. Além disso, pesquisas anteriores, incluindo trabalhos de Viras et al. (1991) [42], Crebelli et al. (2008) [43], Batalha et al. (1999) [44], e Guimarães et al. (2000) [45], mostram que os poluentes atmosféricos urbanos têm o potencial de induzir genotoxicidade em diversas formas de vida, desde plantas até células de mamíferos e bactérias.

A Figura 5 destaca a frequência de micronúcleos encontrados. O Trad-MCN, padronizado para ser aplicado em clones de *Tradescantia*, baseia-se na contagem de micronúcleos encontrados em células-mãe dos grãos de pólen na fase de tétrades jovens [46]. A formação de micronúcleos é decorrente de irregularidades na segregação cromossômica, podendo resultar da migração precoce ou lenta dos cromossomos para os polos. Essas anormalidades podem ser corrigidas em fases posteriores, mas podem não se incluir nos núcleos telofásicos, resultando na formação de micronúcleos [23, 28].

De acordo com Mendes-Bonato et al. (2001) [28] e Adamowski et al. (2005) [47], os micronúcleos que se formam durante a meiose podem permanecer até a fase de tétrade, desintegrar-se durante a meiose ou serem perdidos durante a citocinese, resultando em grãos de pólen geneticamente desequilibrados e estéreis.

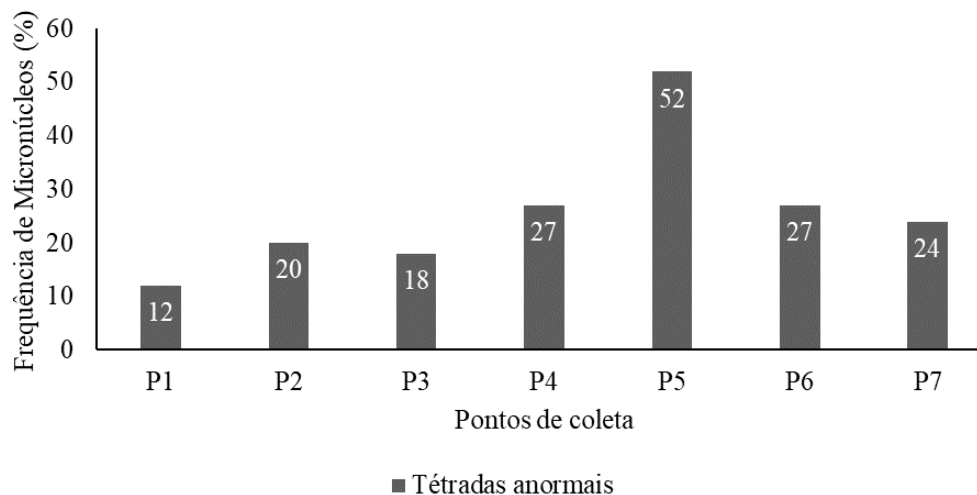


Figura 5: Frequência de micronúcleos encontrados nas células-mãe dos grãos de pólen nos diferentes pontos de coleta.

A Figura 6 demonstra a frequência de micronúcleos por micrósporo nas tétrades analisadas, com destaque para o ponto 5 que apresentou a maior frequência de micronúcleos, variando de uma a quatro células por tétrade de micrósporo.

Esses resultados estão em concordância com outros estudos previamente descritos na literatura que utilizaram testes de micronúcleos de *Tradescantia* para avaliar a genotoxicidade dos poluentes do ar, incluindo os provenientes de veículos automotivos [48].

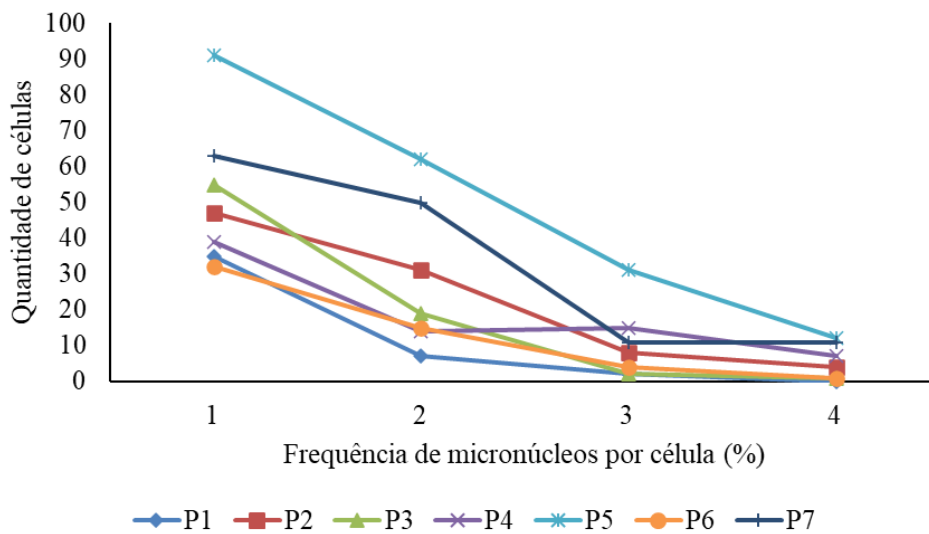


Figura 6: Frequência de micronúcleos em micrósporos das células-mãe dos grãos de pólen.

Ao analisar as Figuras 2, 5 e 6 e a Tabela 1, é possível observar que os pontos 1, 2 e 3 apresentaram menor frequência de micronúcleos, enquanto os pontos 4, 6 e 7 apresentaram frequência intermediária e o ponto 5 apresentou a maior frequência. Isso se deve a diversos fatores, incluindo a intensidade do tráfego de veículos automotores próximo aos locais onde os botões foram coletados.

Tabela 1: Número de células analisadas e porcentagem de células com anormalidades.

Pontos	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Total de Células Analisadas	Total de Células Anormais (%)
	Número de células analisadas (%) anormais				
1	2500 - 20,7	2500 - 21,2	2500 - 20,5	7500	16,0
2	2500 - 09,4	2500 - 26,3	2500 - 36,1	7500	18,0
3	2500 - 15,7	2500 - 28,3	2500 - 39,5	7500	21,8
4	2500 - 28,9	2500 - 22,1	2500 - 29,0	7500	20,5
5	2500 - 31,8	2500 - 50,2	2500 - 45,3	7500	30,4
6	2500 - 33,4	2500 - 23,8	2500 - 34,0	7500	24,7
7	2500 - 21,6	2500 - 23,9	2500 - 35,2	7500	22,9

As evidências de efeitos genotóxicos relacionados à poluição do ar são consistentes em diversos estudos. Monarca et al. (1999) [49] constataram que plantas expostas a amostras de ar provenientes de ruas com tráfego intenso de veículos apresentaram uma frequência maior de micronúcleos em comparação com locais de tráfego médio e baixo. Estudos subsequentes de Mišík et al. (2006) [50] revelaram que as frequências de micronúcleos em micrósporos meióticos de *Tradescantia*, expostos ao ar poluído nas proximidades de uma indústria agroquímica, eram superiores àquelas em plantas expostas à poluição do tráfego urbano ou próximas a um incinerador municipal. Além disso, pesquisas de Ruiz et al. (1992) [51], em experimentos *in situ* em áreas residenciais e industriais, também encontraram aumentos nas frequências de micronúcleos, indicando uma associação entre a presença de poluentes atmosféricos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) e metais traço, e danos ao DNA.

Os resultados de Prajapati et al. (2008) [15] complementam essas descobertas, destacando que o bioensaio de micronúcleos *Tradescantia* (Trad-MCN) em plantas expostas a áreas com maiores emissões de tráfego evidencia frequências de micronúcleos mais altas do que amostras mantidas em locais de controle, desprovidas de qualquer emissão de tráfego. Resultados semelhantes foram encontrados por Teixeira et al. (2012) [52], que, ao monitorar a qualidade do ar em Taubaté-SP, utilizando o bioensaio com *Tradescantia pallida* var. *purpurea*, observaram efeitos genotóxicos relacionados à poluição atmosférica

Além dos poluentes veiculares, os efeitos genotóxicos de outras substâncias como do dióxido de enxofre e óxido nítrico em plantas de *Tradescantia* foram descritos por Ma et al. (1982) [48], que avaliaram canteiros localizados próximos a indústrias, paradas de caminhões e ônibus, bem como a concentração de poluentes atmosféricos originários de indústrias e combustíveis fósseis. Em outros estudos, foram descritos os efeitos genotóxicos do monóxido de carbono e do chumbo em *Salmonella* e *Saccharomyces* [53, 54]. A influência de fatores ambientais, como chuvas, direção do vento, oscilações de temperatura e localização geográfica, também foi reconhecida como potencialmente afetando a dispersão dos poluentes e, conseqüentemente, a avaliação dos efeitos genotóxicos da poluição atmosférica [55].

Ao considerar dados específicos, a confirmação de que o ponto 5 foi o mais afetado destaca-se, evidenciando um maior fluxo de veículos de todas as classes nessa localidade (Figura 7). Tais resultados indicam os efeitos genotóxicos das emissões oriundas dos veículos, evidenciados pela frequência de anormalidades meióticas encontradas nas amostras de *Tradescantia pallida*. Estes resultados corroboram com estudos como o de Klumpp et al. (2006) [56], que, ao realizar testes de Trad-MCN em 65 locais com diferentes níveis de tráfego veicular em 10 cidades europeias, verificaram que locais urbanos com tráfego intenso revelaram um potencial genotóxico elevado.

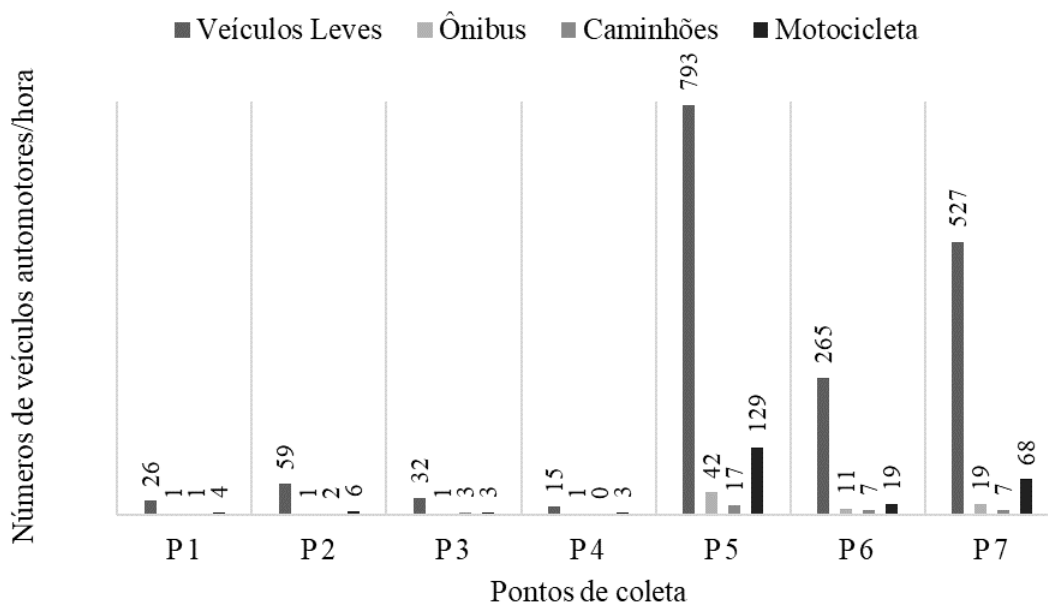


Figura 7: Média de veículos que transitam em horários de fluxo intenso próximo aos pontos de coleta em Irati-PR.

Estudos realizados por Batalha et al. (1999) [57], Guimarães et al. (2000) [58] e Carvalho-Oliveira et al. (2005) [59] em São Paulo confirmaram a alta sensibilidade da *Tradescantia* aos poluentes atmosféricos urbanos, e em outros locais brasileiros com menor fluxo de veículos, Andrade Júnior et al. (2008) [10] confirmaram esse fato em Senhor do Bonfim-BA e Crispim et al. (2012) [60] em Dourados-MT. No norte da Itália, Monarca et al. (1999) [49] utilizaram o teste de MCN e observaram altos níveis de poluição quando as plantas foram expostas em túneis

rodoviários. Isidori et al. (2003) [61] também encontraram altas taxas de micronúcleos em *Tradescantia* expostas a trânsito intenso, especialmente durante a estação de inverno na cidade de Caserta, sul da Itália.

Na cidade de Perugia, região central da Itália, Villarini et al. (2009) [62] confirmaram o potencial genotóxico em plantas expostas em áreas com elevados índices de poluição, através de ensaios com micronúcleos. Blume et al. (2014) [63] em Sapucaia do Sul também observaram elevadas frequências de micronúcleos durante o período de exposição da *Tradescantia pallida*. Em Sorocaba, foram analisados três pontos para realizar o bioensaio com a *Tradescantia pallida* var. *purpúrea* e foi comprovado o potencial genotóxico na região central da cidade [64].

A implementação de novos procedimentos tem contribuído para reduzir a presença de poluentes emitidos não apenas por veículos leves e motocicletas, mas também por caminhões e ônibus, que possuem características distintas em função do combustível utilizado. A redução dos níveis de enxofre no óleo diesel diminuiu em até 85% a emissão de dióxido de enxofre na cidade de São Paulo ao longo de um período de 23 anos. Além disso, substituiu-se o chumbo da gasolina pelo álcool, reduzindo os níveis deste poluente em mais de 95%. Para automóveis, introduziu-se catalisadores e injeção eletrônica, resultando em níveis de monóxido de carbono até 60% menores nos últimos vinte anos [65].

É possível observar que o ponto 5, além de possuir o maior fluxo de veículos dentre os pontos analisados, está próximo a uma pequena indústria madeireira, contribuindo para aumentar o índice de poluentes e, conseqüentemente, as anormalidades nas amostras deste local. Mariani (2008) [66] realizou o mesmo teste em São José dos Campos e obteve resultados semelhantes em áreas com indústrias próximas ao local de estudo. Em relação ao ponto 3, localizado distante do centro da cidade e com tráfego constante, por se tratar de uma rodovia, possui grande quantidade de áreas verdes quando comparado aos outros pontos. Segundo Elawa (2022) [67], em estudo realizado no Egito foi constatado que áreas verdes com cultivo de árvores apresentam um decréscimo na poluição atmosférica.

A crescente urbanização e o aumento do número de pessoas expostas à poluição do ar têm despertado preocupações significativas em relação aos riscos para a saúde, especialmente no que diz respeito à incidência de câncer de pulmão [68-70]. Conforme destacado por Lim et al. (2012) [71], a poluição do ar é identificada como o fator de risco ambiental mais significativo associado a esse tipo de câncer. Esse cenário realça a vulnerabilidade de uma grande parcela da população aos efeitos prejudiciais dos poluentes atmosféricos, evidenciando a necessidade urgente de abordagens eficazes para mitigar esses riscos [72].

Apesar dos avanços obtidos por meio de regulamentações e práticas ambientais voltadas à redução das emissões veiculares, os resultados apresentados neste estudo destacam a necessidade contínua de aprimorar o monitoramento ambiental. A relação direta entre o aumento na frequência de anormalidades genéticas e a intensificação do tráfego veicular, sobretudo em áreas próximas a indústrias, reforça a importância de políticas que incentivem fontes de energia mais limpas e práticas industriais sustentáveis.

No contexto desses desafios, os testes com a *Tradescantia* emergem como uma ferramenta valiosa de avaliação. Sua simplicidade, baixo custo e rapidez na realização do ensaio oferecem vantagens significativas. Além disso, a capacidade da planta de se propagar vegetativamente assegura uniformidade genética nos experimentos. A possibilidade de conduzir ensaios ao longo de todo o ano, aproveitando o florescimento constante da *Tradescantia*, amplia ainda mais a utilidade dessa abordagem para a monitorização a longo prazo da qualidade do ar. Esses aspectos reforçam a relevância e eficácia dos testes com a *Tradescantia* como uma ferramenta valiosa no contexto do monitoramento ambiental.

4. CONCLUSÃO

A utilização do teste de micronúcleos em *Tradescantia pallida* var. *purpúrea* é uma ferramenta eficaz para avaliar o efeito genotóxico dos poluentes atmosféricos relacionados ao tráfego veicular em diferentes setores do município de Irati, Paraná, o que permitiu comparar os resultados obtidos com a frequência de anormalidades meióticas e o fluxo de tráfego de veículos.

Os resultados indicam que os níveis de poluição relacionados ao tráfego intenso de veículos automotores afetam a dinâmica da divisão celular em todas as fases da microsporogênese, aumentando a frequência de anormalidades meióticas e formação micronúcleos. Esse efeito pode estar associado à interferência dos poluentes na organização dos cromossomos na placa metafásica, ao desenvolvimento de aderências e à segregação irregular de cromossomos durante as anáfases I e II, o que resulta em tétrades anormais e pólenes inviáveis ou estéreis. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas com tráfego intenso e da implementação de medidas para reduzir a emissão de poluentes, com o objetivo de minimizar os impactos na saúde pública e no meio ambiente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo apoio financeiro concedido através do edital N°001/2017, bem como ao Departamento do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, campus de Irati, pelo suporte na coleta de amostras e análise de dados durante a pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. De la Cruz ARH, Ayuque RFO, De la Cruz RWH, López-Gonzales JL, Gioda A. Air quality biomonitoring of trace elements in the metropolitan area of Huancayo, Peru using transplanted *Tillandsia capillaris* as a biomonitor. *An Acad Bras Cienc.* 2020 Apr;92(1):e20180813. doi: 10.1590/0001-3765202020180813
2. Masri S, Kang CM, Koutrakis P. Composition and sources of fine and coarse particles collected during 2002–2010 in Boston, MA. *J Air Waste Manag Assoc.* 2015 Feb;65(3):287-97. doi: 10.1080/10962247.2014.982307
3. Fleck AS, Moresco MB, Rhoden CR. Assessing the genotoxicity of traffic-related air pollutants by means of plant biomonitoring in cities of a Brazilian metropolitan area crossed by a major highway. *Atmos Pollut Res.* 2015 May;7(3):488-93. doi: 10.1016/j.apr.2015.12.002
4. Moreira TC, de Oliveira RC, Amato LFL, Kang CM, Saldiva PHN, Saiki M. Intra-urban biomonitoring: Source apportionment using tree barks to identify air pollution sources. *Environ Int.* 2016 May;91:271-5. doi: 10.1016/j.envint.2016.03.005
5. Lawson SJ, Galbally IE, Powell JC, Keywood MD, Molloy SB, Cheng M, et al. The effect of proximity to major roads on indoor air quality in typical Australian dwellings. *Atmos Environ.* 2011 Apr;45(13):2252-9. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.024
6. Carreras HA, Pignata ML, Saldiva PHN. *In situ* monitoring of urban air in Córdoba, Argentina using the *Tradescantia*-micronucleus (Trad-MCN) bioassay. *Atmos Environ.* 2006 Dec;40(40):7824-30. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.07.031
7. Rainho CR, Corrêa SM, Mazzei JL, Aiub CAF, Felzenszwalb I. Genotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-derived in respirable airborne particulate matter collected from urban areas of Rio de Janeiro (Brazil). *Res Int.* 2013. May;2013:765352. doi: 10.1155/2013/765352
8. Gregušková E, Mičieta K. Phytoindication of the ecogenotoxic effects of vehicle emissions using pollen abortion test with native flora. *Pol J Environ Stud.* 2013 Jan;22(4):1069-76.
9. Santos AP, Segura-Muñoz SI, Nadal M, Schuhmacher M, Domingo JL, Martinez CA, et al. Traffic-related air pollution biomonitoring with *Tradescantia pallida* (Rose) Hunt. cv. *purpurea* Boom in Brazil. *Environ Monit Assess.* 2015 Jan;187(39):1-10. doi: 10.1007/s10661-014-4234-3
10. Andrade Júnior SJ, Silva Santos Júnior JC, Oliveira JL, Marcílio Cerqueira EM, Meireles JRC. Micronúcleos em tétrades de *Tradescantia pallida* (Rose) Hunt. cv. *purpurea* Boom: alterações genéticas decorrentes de poluição aérea urbana. *Acta Sci Biol Sci.* 2008; Oct;30(3):295-301. doi: 10.4025/actascibiolsoci.v30i3.5017
11. International Agency for Research on Cancer Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Lyon (CH): International Agency for Research on Cancer; 2013. Disponível em: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr221_E.pdf
12. Hystad P, Demers PA, Johnson KC, Carpiano RM, Brauer M. Long-term residential exposure to air pollution and lung cancer risk. *Epidemiology.* 2013 Jan;24:762-72. doi: 10.1097/EDE.0b013e3182949ae7

13. Chen F, Jackson H, Bina WF. Lung adenocar - cinoma incidence rates and their relation to motor vehicle density. *Cancer Epidem Biomar Prev.* 2009 Jan;3:760-4. doi: 10.1158/1055-9965.epi-08-0741
14. Bünger J, Jürgen K, Hans-Ulrich F, Axel M, Ernst H. Mutagenic and cytotoxic effects of exhaust particulate matter of biodiesel compared to fossil diesel fuel. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 1998 Jul;415:13-23. doi: 10.1016/S1383-5718(98)00039-4
15. Prajapati SK, Tripath BD. Assessing the genotoxicity of urban air pollutants in Varanasi City using *Tradescantia* micronucleus (Trad-MCN) bioassay. *Environ Int.* 2008 Nov;34(8):1092-6. doi: 10.1016/j.envint.2008.03.009
16. Ceglinski L de V, Garcia EM, Reis FO, Tavella RA, Silva Júnior FMR da. Air quality assessment using the Pollen Abortion assay in *Tradescantia pallida* in a Mid-sized City in Southern Brazil. *Rev. Soc. cient. Parag.* 2021 June;26(1):6-16. doi: 10.32480/rscp.2021.26.1.6
17. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades e Estados [Internet]; [citado em 07 mar 2023]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/irati.html>
18. Aparecido LEO, Rolim GS, Richetti J, Souza PS, Johann JA. Classificações climáticas de Köppen, Thornthwaite e Camargo para o zoneamento climático do Estado do Paraná, Brasil. *Agric Sci.* 2016 Jul-Aug;40(4):405-17. doi: 10.1590/1413-70542016404003916
19. Ministério da Infraestrutura. Frota de Veículos – 2022. Gov.br [Internet]; [citado em 07 mar 2023]. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>
20. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DENIT). Manual de estudos de tráfego. Rio de Janeiro: DNIT; 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf
21. Tucker JD, Preston JR. Chromosome aberrations, micronuclei, aneuploidy, sister chromatid exchanges, and cancer risk assessment. *Mutat Res.* 1996 Sep;365(1-3):147-59. doi: 10.1016/S0165-1110(96)90018-4
22. Carreras HA, Calderón-Segura ME, Gómez-Arroyo S, Murillo-Tovar MA, Amador-Muñoz O. Composition and mutagenicity of PAHs associated with urban airborne particles in Córdoba, Argentina. *Environ Pollut.* 2013 Jul;178:403-10. doi: 10.1016/j.envpol.2013.03.016
23. Adamowski EV, Pagliarini MS, Batista LAR. Chromosome number and microsporogenesis in *Paspalum maritimum* (Caespitosa Group; Gramineae). *Braz Arch Biol Technol.* 2000 Jul;43(3):1-6. doi: 10.1590/S1516-89132000000300009
24. Guerra M. Introdução a citogenética geral. 1. ed. Rio de Janeiro (RJ): Guanabara; 1988.
25. Gulfishan M, Khan AH, Jafri IF, Bhat TA. Assessment of mutagenicity induced by MMS and DES in *Capsicum annum L.* *Saudi J Biol Sci.* 2012 Apr;19(2):251-5. doi: 10.1016/j.sjbs.2011.11.003
26. Rao PN, Ranganadham P, Nirmala A. Behaviour of a 'sticky-desynaptic' mutant in pearl millet. *Genetica.* 1990 Sep;81:221-7. doi: 10.1007/BF00360869
27. Kiihl PRP, Pereira ARA, Godoy SM, Stenzel NMC, Risso-Pascotto C. Chromosome stickiness during meiotic behavior analysis of *Passiflora serrato-digitata L.* (PASSIFLORACEAE). *Ciênc Rural.* 2011 Jun;41(6):1018-23. doi: 10.1590/S0103-84782011005000076
28. Mendes-Bonato AB, Pagliarini MS, Do Valle CB, Penteadó MIO. A severe case of chromosome stickiness in pollen mother cells of *Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf (Gramineae). *Cytologia.* 2001 Sep;66(3):287-91. doi: 10.1508/cytologia.66.287
29. Beadle GW. A gene in *Zea mays* for failure of cytokinesis during meiosis. *Cytologia.* 1932 Apr;3(2):142-55. doi: 10.1508/cytologia.3.142
30. Utsunomiya KS, Pagliarini MS, do Valle CB. Microsporogenesis in tetraploid accessions of *Brachiaria nigropedata* (Ficalho & Hiern) Stapf (Gramineae). *Biocell.* 2005 Dec;29(3):295-30. doi: 10.32604/biocell.2005.29.295
31. Risso-Pascotto C, Pagliarini MS, do Valle CB. A new basic chromosome number for the genus *Brachiaria* (Trin.) Griseb. (Poaceae:Panicoideae:Paniceae). *Genet Res. Crop Evol.* 2006 Feb;53(1):7-10. doi: 10.1007/s10722-005-7762-4
32. Mendes-Bonato AB, Pagliarini MS, do Valle CB. Meiotic arrest compromises pollen fertility in an interspecific hybrid between *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria decumbens* (Poaceae: paniceae). *Braz Arch Biol Technol.* 2007 Sep;50(5):831-7. doi: 10.1590/S1516-89132007000500011
33. Pagliarini MS, Risso-Pascotto C, de Souza-Kaneshima, AM, do Valle CB. Analysis of meiotic behavior in selecting potential genitors among diploid and artificially induced tetraploid accessions of *Brachiaria ruziziensis* (Poaceae). *Euphytica.* 2008 May;164:181-7. doi: 10.1007/s10681-008-9697-2
34. Risso-Pascotto C, Pagliarini MS, do Valle CB. Microsporogenesis in *Brachiaria bovonei* (Chiov.) Robyns and *B. subulifolia* (Mez) Clayton (Poaceae). *Sci Agric.* 2009 Oct;66(5):691-6. doi: 10.1590/S0103-90162009000500015

35. Nassar NMA. Cytogenetics and evolution of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Genet Mol Biol. 2000 Dec;23(4):1003-14. doi: 10.1590/S1415-47572000000400046
36. Risso-Pascotto C, Pagliarini MS, do Valle CB. Multiple spindles and cellularization during microsporogenesis in an artificially induced tetraploid accession of *Brachiaria ruziziensis* (Gramineae). Plant Cell Rep. 2005 Jan;23(8):522-7. doi: 10.1007/s00299-004-0867-y
37. Mendes-Bonato AB, Risso-Pascotto C, Pagliarini MS, do Valle CB. Chromosome number and meiotic behavior in *Brachiaria jubata* (Gramineae). J Genet. 2006 Apr;85(1):83-7. doi: 10.1007/BF02728976
38. Souza MM, Martins ER, Pereira TNS, Oliveira LO. Reproductive studies on ipecac (*Cephaelis ipecacuanha* (Brot.) A. Rich; Rubiaceae): meiotic behavior and pollen viability. Braz J Biol. 2006 Feb;66(1A):151-9. doi: 10.1590/s1519-69842006000100019
39. Singhal VK, Kumar P. Cytomixis during microsporogenesis in the diploid and tetraploid cytotypes of *Withania somnifera* (L.) Dunal, 1852 (Solanaceae). Comp Cytogenetics, 2008 Jan;2(1):85-92.
40. Grossi JA, de Godoy SM, Macedo CR, de Paula GBN, Romagnolo MB, Risso-Pascotto C. Comportamento meiótico durante a microsporogênese em espécies da família Meliaceae. Arq Ciênc Vet Zool. UNIPAR. 2011 Jan-Jun;14(1):51-6.
41. Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. Jama. 2002;287(9):1132-41. doi: 10.1001/jama.287.9.1132
42. Viras LG, Siskos PA, Samara C, Kouimtzi T, Athanasiou K, Vavatzandis A. Polycyclic aromatic hydrocarbons and mutagens in ambient air particles sampled in Thessaloniki, Greece. Atmos Environ. 1991 Aug;10(8):999-1007. doi: 10.1002/etc.5620100804
43. Crebelli R, Fuselli S, Baldassarri LT, Ziemacki G, Carere A, Benigni R. Genotoxicity of urban air particulate matter: correlations between mutagenicity data, airborne micropollutants and meteorological parameters. Int J Environ Health. 2008 Sep;5(1):19-34. doi: 10.1080/09603129509356830
44. Batalha JRF, Guimarães ET, Lobo DJA, Lichtenfels AJFC, Deur T, Carvalho HA, et al. Exploring the clastogenic effects of air pollution in São Paulo (Brazil) using the *Tradescantia* micronuclei assay. Mutat Res Mutat Res. 1999 May;426(2):229-32. doi: 10.1016/s0027-5107(99)00073-1
45. Guimaraes ET, Domingos M, Alves ES, Caldini Jr N, Lobo DJA, Lichtenfels AJFC, et al. Detection of the genotoxicity of air pollutants in and around the city of São Paulo (Brazil) with the *Tradescantia* micronucleus (Trad-MCN) assay. Environ Exp Bot. 2000;44:1-8.
46. Ma TH. *Tradescantia* micronucleus (TRAD-MCN) test of environmental clastogens. In: Kolber AR, Wong TK, Grant LD, Dewonki RS, Hughes TJ, editors. In vitro toxicity testing of environmental agents, current and future possibilities. New York (US): Plenum; 1983. p. 191-214.
47. Adamowski EV, Pagliarini MS, Bonato ABM, Batista LAR, Valls JFM. Chromosome numbers and meiotic behavior of some *Paspalum* accessions. Genet Mol Biol. 2005 Dec;28(4):773-80. doi: 10.1590/S1415-47572005000500020
48. Ma TH, Anderson VA, Ahmed I. Environmental clastogens detected by meiotic pollen mother cells of *Tradescantia*. In: Tice RR, Costa DL, Schaich KM, editors. Genotoxic effects of airborne agents. Environmental Science Research. New York (US): Plenum Press; 1982. p. 141-57.
49. Monarca S, Feretti D, Zanardini A, Falistocco E, Nardi G. Monitoring of mutagens in urban air sample. Mutat Res. 1999 May;426(2):189-92. doi: 10.1016/S0027-5107(99)00066-4
50. Mišík M, Solenská M, Mičieta K, Katarína M, Siegfried K. *In situ* monitoring of clastogenicity of ambient air in Bratislava, Slovakia using the *Tradescantia* micronucleus assay and pollen abortion assays. Mutat Res 2006 Jun 16;605(1-2):1-6. doi: 10.1016/j.mrgentox.2005.12.009
51. Ruiz EF, Rabago VME, Lecona SU, Perez AB, Ma TH. *Tradescantia*-micronucleus (TradMCN) bioassay on clastogenicity of waste water and *in situ* monitoring. Mutat Res 1992 Nov 1;270(1):45-51. doi: 10.1016/0027-5107(92)90100-g
52. Teixeira MCV, Barbério A. Biomonitoramento do ar com *Tradescantia pallida* (Rose) D. R. Hunt var *purpurea* Boem (Commelinaceae). Rev. Ambient. Água. 2012 Dez;7(3):279-92. doi: 10.4136/ambi-agua.982
53. Arroyo PL, Hatchpigott V, Mowewr HF, Cooney RV. Mutagenicity of nitric-oxide and its inhibition by antioxidants. Mutat Res Lett. 1992 Mar;281(3): 193-202. doi: 10.1016/0165-7992(92)90008-6
54. Poli P, Buschini A, Campanini N, Vettori MV, Cassoni F, Cattani S, et al. Urban air-pollution-use of different mutagenicity assays to evaluate environmental genetic hazard. Mutat Res. 1992 Dec;298(2):113-23. doi: 10.1016/0165-1218(92)90036-y
55. Alves ES, Pedroso ANV, Guimarães ET, Domingos M, Saldiva PHN. Biomonitoramento indoor do potencial mutagênico do ar em laboratórios e herbário do Instituto de Botânica por meio do bioensaio Trad-MCN. Hoehnea. 2003 Jan;30(2):89-94.

56. Klumpp A, Ansel W, Klumpp G, Calatayud V, Garrec JP, He S, et al. *Tradescantia* micronucleus test indicates genotoxic potential of traffic emissions in European cities. *Environ Pollut.* 2006 Feb;139(3):515-22. doi: 10.1016/j.envpol.2005.05.021
57. Batalha JRF, Guimarães ET, Lobo DJA, Lichtenfels AJFC, Deur T, Carvalho HA, et al. Exploring the clastogenic effects of air pollutants in São Paulo (Brazil) using the *Tradescantia* micronuclei assay. *Mutat Res.* 1999 May;426(2):229-32. doi: 10.1016/S0027-5107(99)00073-1
58. Guimarães ET, Domingos M, Alves ES, Caldini N, Lobo DJ, Lichtenfels AJ, et al. Detection of the genotoxicity of air pollutants in and around the city of São Paulo (Brazil) with the *Tradescantia*-micronucleus (Trad-MCN) assay. *Environ Exp Bot.* 2000 Aug;44(1):1-8. doi: 10.1016/s0098-8472(00)00050-2
59. Carvalho-Oliveira R, Pozo RMK, Lobo DJA, Lichtenfels AJFC, Martins-Junior HA, Bustilho JOWV, et al. Diesel emissions significantly influence composition and mutagenicity of ambient particles: a case study in São Paulo, Brazil. *Environ Res.* 2005 May;98(1):1-7. doi: 10.1016/j.envres.2004.05.007
60. Crispim BA, Vaini JO, Grisolia AB, Teixeira TZ, Mussury RM, Seno LO. Biomonitoring the genotoxic effects of pollutants on *Tradescantia pallida* (Rose) D.R. Hunt in Dourados, Brazil. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2012 Mar;19(3):718-23. doi: 10.1007/s11356-011-0612-3
61. Isidori M, Ferrara M, Lavorgna M, Nardelli A, Parrella A. *In situ* monitoring of urban air in Southern Italy with the *Tradescantia* micronucleus bioassay and semipermeable membrane devices (SPMDs). *Chemosphere.* 2003 Jul;52(1):121-6. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00183-8
62. Villarini M, Fatigoni C, Dominici L, Maestri S, Ederli E, Pasqualini S, et al. Assessing the genotoxic of urban air pollutants using two *in situ* plant bioassays. *Environ Pollut.* 2009 Dec;157(12):3354-6. doi: 10.1016/j.envpol.2009.09.012
63. Blume KK, Costa GM, Cassanego MBB, Droste A. Genotoxicidade do ar em área urbana na região metropolitana de Porto Alegre, RS, Brasil. *Rev Bras Biociências.* 2014 Sep;12(3):158-63.
64. Xisto LAD, Morgan NMT, Freitas NP. Utilização da espécie *Tradescantia pallida* cv. *purpúrea* como bioindicadora da qualidade do ar, através de bioensaio de micronúcleo. *Rev Univ Vale do Rio Verde.* 2017 Dec;15(2):812-21 doi: 10.5892/ruvrd.v15i2.3243
65. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Série Relatórios: Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo; 2004 [citado em 07 mai 2023]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>
66. Mariani RL, Jorge MPM, Pereira SS. Caracterização da qualidade do ar em São José dos Campos-SP, utilizando *Tradescantia pallida* (TRAD-MCN). *Geochim Bras.* 2008 Feb;22(1):27-33.
67. Elawa O, Galal TM, Abdel-Latif NM, Farahat EA. Evaluating the potential use of four tree species in the greenbelts to mitigate the cement air pollution in Egypt. *Egypt J Bot.* 2022 Jan;62(1):177-96. doi: 10.21608/ejbo.2021.94944.1780
68. Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, Samoli E, Stafoggia M, Weinmayr G, et al. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Lancet Oncol.* 2013 Aug;14(9):813-22. doi: 10.1016/S1470-2045(13)70279-1
69. Hamra GB, Guha N, Cohen A, Laden F, Raas - chou-Nielsen O, Samet JM, et al. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: A systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect* 2014 Sep;122(9):906-11. doi: 10.1289/ehp/1408092
70. Raaschou-Nielsen O, Beelen R, Wang M, Hoek G, Andersen ZJ, Hoffmann B, et al. Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer. *Environ Int.* 2016 Feb;87:66-73. doi: 10.1016/j.envint.2015.11.007
71. Lim SS, Vos T, Flaxman AD, Danaei G, Shibuya K, Adair-Rohani H, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet.* 2012 Dec 15;380(9859):2224-60. doi: 10.1016/S0140-6736(12)61766-8
72. Fajersztajn L, Veras M, Barrozo LV, Saldiva P. Air pollution: A potentially modifiable risk factor for lung cancer. *Nat Rev Cancer*;2013 Sep;13(9):674-8. doi: 10.1038/nrc3572