



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

GABRIEL GALVÃO MAIA PORPINO

RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS DE TOMATEIROS (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom) À EXPOSIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS

João Pessoa
2024

GABRIEL GALVÃO MAIA PORPINO

RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS DE TOMATEIROS (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom) À EXPOSIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Biológicas (Trabalho Acadêmico de conclusão de Curso), como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciências Biológicas da Universidade Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Rocha Rodrigues Alves

João Pessoa
2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P837r Porpino, Gabriel Galvao Maia.

Respostas morfofisiológicas de tomateiros (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom) à exposição de microplásticos / Gabriel Galvao Maia Porpino. - João Pessoa, 2024.

41. : il.

Orientação: Frederico Rocha Rodrigues Alves.

TCC (Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas) - UFPB/CCEN.

1. Estresse fisiológico. 2. fisiologia vegetal. 3. Polietileno. I. Alves, Frederico Rocha Rodrigues. II. Título.

UFPB/CCEN

CDU 57(043.2)

GABRIEL GALVÃO MAIA PORPINO

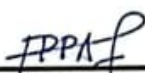
RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS DE TOMATEIROS (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom) À EXPOSIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Biológicas, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciências Biológicas da Universidade Federal da Paraíba.

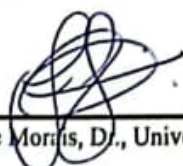
Data: 21/10/24

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:

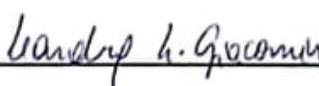


Frederico Rocha Rodrigues Alves, Dr., Universidade Federal da Paraíba



Fernando Ferreira de Morais, Dr., Universidade Federal da Paraíba

Juliana Lovo, Dra., Universidade Federal da Paraíba



Leandro Lacerda Giacomini, Dr., Universidade Federal da Paraíba

***Dedico a Rosa, Linda e Miah por me ensinarem
o que é o amor verdadeiro.***

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me colocar em um bom caminho e preencher minha vida com bençãos. Sem minha fé eu não estaria aqui.

Agradeço muito à minha família. À minha mãe por todos os conselhos e por ser minha melhor amiga, confidente e a maior inspiração na minha vida. Agradeço também à minha segunda mãe, tia São, por sempre estar presente na minha história e por todo o amor e carinho. À minha prima Bárbara, que considero minha irmã. Aos meus tios Beto e Armando. À minha tia Nani que, mesmo não estando mais presente entre nós, marcou minha vida grandemente: sempre lembrarei de sua risada. Aos meus avós Biluca e Socorro: sei que vocês me guiam e me protegem todos os dias.

Aos meus amigos de quase uma década: Iury, por todos os momentos especiais e conversas diárias, você é uma das pessoas mais importantes da minha vida; Gabriel Monteiro e Antônio, meus parceiros do ensino médio para a vida. Aos meus amigos da faculdade: Breno, Emilly, Gabriel Castro e Raíssa, obrigado por me acolherem e se fazerem presentes em minha vida durante todos os altos e baixos da graduação.

Agradeço à UFPB por todo o apoio e estrutura. Agradeço a todos os professores da graduação por todos os conselhos e conhecimento a mim direcionados. Especialmente, agradeço a Sarah Athiê por ser a primeira a acreditar em mim e me oferecer um estágio e monitoria ainda no primeiro período do curso, despertando meu amor pela botânica. Agradeço a Juliana por todos os ensinamentos. Agradeço a Fred por aceitar atuar como meu orientador e por todos os conselhos e aprendizados. Agradeço, também, aos meus colegas de laboratório, Vitória, Wanderson e Yago, por todo o apoio.

Agradeço grandemente à banca, composta por professores que marcaram minha trajetória pela graduação, por aceitarem o convite.

E agradeço especialmente a Rosa, Linda e Miah por me ensinarem o verdadeiro significado de amar. Miah, sei que iremos nos reencontrar algum dia. Também agradeço a Pretinho, Nevinha, Malhinha e tantos outros amigos de quatro patas.

Finalmente, agradeço a todas as pessoas que um dia passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

RESUMO

Os plásticos têm se tornado uma problemática central na sociedade, muito em função do crescente número de resíduos gerados pela população mundial. Em especial, o polietileno constitui um dos principais materiais poliméricos utilizados na contemporaneidade, possuindo um papel central na indústria e no dia a dia. Contudo, o descarte incorreto deste insumo traz consequências diretas ao meio ambiente e os organismos nele inseridos. Apesar das plantas serem organismos especialmente suscetíveis às mudanças ambientais, pouco é sabido sobre as dinâmicas da poluição por microplásticos e a influência destes materiais sobre os processos fisiológicos, sobretudo no que se refere ao desenvolvimento vegetal. Neste contexto, o tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) se caracteriza como uma das espécies vegetais mais importantes do ponto de vista socioeconômico, cultural e científico. Particularmente, a variedade Micro-Tom vem sendo utilizada como um modelo no âmbito das ciências devido à sua cultura de ciclo relativamente curto e fácil manipulação. Destarte, o presente trabalho teve como objetivo investigar as consequências da aplicação de microfibras do polímero plástico polietileno no substrato sobre o desenvolvimento do tomateiro. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos (substrato controle sem microfibras de polietileno, substrato com 0,6% m/m e 2,4% m/m de microfibras de polietileno) e sete repetições por tratamento. Verificou-se os seguintes parâmetros de crescimento: diâmetro do caule e massa seca de raiz, parte aérea, folhas e frutos. A presença dos microplásticos não impactou de forma significativa parâmetros referentes à alocação de biomassa, mas favoreceu o aumento da espessura do caule, possivelmente devido à expansão do calibre dos vasos condutores. Os dados permitem concluir que o polietileno altera as dinâmicas hídricas do solo, mas, em última análise, não possui alta fitotoxicidade para a cultura do tomate.

Palavras-chave: estresse, fisiologia vegetal, polietileno.

ABSTRACT

Plastics have become a central problem in society, largely due to the increasing amount of waste generated by the world's population. Polyethylene, in particular, is one of the main polymeric materials used today, playing a central role in industry and in everyday life. However, the incorrect disposal of this material has direct repercussions on the environment and the organisms that live in it. Although plants are organisms that are especially susceptible to environmental changes, little is known about the dynamics of microplastic pollution and the influence of these materials on ecosystemic processes, especially with regards to plant development. In this context, the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most important plant species from a socioeconomic, cultural and scientific point of view. In particular, the Micro-Tom variety has been widely used as a model in the field of science due to its relatively short crop cycle and easy handling. Therefore, in the light of the aforementioned information, the present study aimed to investigate the impact of the application of polyethylene fibers in the substrate on the development of tomato plants. The experiment was conducted in a completely randomized design with three treatments (control substrate without polyethylene microfibers, 0,6% m/m and 2,4% m/m microfibers of polyethylene) and seven repetitions per treatment. The following growth parameters were observed: stem diameter and root, shoots, leaves and fruits dry mass. The presence of microplastics did not have any repercussions on the parameters related to biomass allocation, but favored the increase in stem thickness, probably due to the expansion of the caliber of the conducting vessels. The data allows us to conclude that polyethylene alters the water dynamics of the soil, but, ultimately, doesn't have high phytotoxicity for the tomato crop.

Keywords: stress, plant physiology, polyethylene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partição de biomassa seca em órgãos de micro-tomateiros submetidos a diferentes concentrações de microfibras de polietileno no substrato. A) Massa seca de folhas em gramas, B) Massa seca de parte aérea em gramas, C) Massa seca de raiz em gramas, D) Massa seca de frutos em gramas. T1: tratamento controle (sem microfibras de polietileno), T2: tratamento contendo 0,6% de microfibras de polietileno no substrato, T3: tratamento contendo 2,4% de microfibras de polietileno no substrato. Os dados estão representados como boxplots, sendo as caixas correspondentes ao intervalo interquartil e as extremidades das barras, aos valores máximos e mínimos. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$)..... 26

Figura 2. Diâmetro do caule (em milímetros) de micro-tomateiros submetidos a diferentes concentrações de microfibras de polietileno no substrato. T1: tratamento controle (sem microfibras de polietileno), T2: tratamento contendo 0,6% de microfibras de polietileno no substrato, T3: tratamento contendo 2,4% de microfibras de polietileno no substrato. Os dados estão representados como boxplots, sendo as caixas correspondentes ao intervalo interquartil e as extremidades das barras, aos valores máximos e mínimos. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).....27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Geral.....	13
2.2 Específicos.....	13
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	14
3.1 O tomate e o cultivar Micro-Tom.....	14
3.2 Plásticos, microplásticos e o polietileno.....	16
3.3 Os microplásticos como estressores na fisiologia vegetal.....	19
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 Localização do experimento e condições de cultivo.....	22
4.2 Preparo do substrato e cultivo dos micro-tomateiros.....	22
4.3 Condução do experimento.....	23
4.4 Variáveis analisadas.....	23
4.5 Delineamento experimental e análises estatísticas.....	23
5 RESULTADOS.....	25
5.1 Massa seca de folhas.....	25
5.2 Massa seca de caules.....	26
5.3 Massa seca de raiz.....	26
5.4 Massa seca de frutos.....	26
5.5 Diâmetro de caule.....	26
6 DISCUSSÃO.....	28
7 CONCLUSÃO.....	30
REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são classificados quimicamente como materiais sintéticos de estrutura polimérica cuja origem é, usualmente, advinda do petróleo (Azeem et al., 2021). Sua classificação se dá, comumente, conforme sua granulometria (ou seja, seu tamanho). O grupo dos microplásticos corresponde àquele cujo diâmetro se encontra entre 100 μ m a 5 mm (Ullah et al., 2021). Dentre as principais classes de microplásticos, destaca-se o polietileno, o polímero plástico mais consumido mundialmente - com um total de mais de 90 milhões de toneladas métricas produzidas por ano -, utilizado para a fabricação de utilidades como embalagens alimentícias, produtos agrícolas e eletroeletrônicos (Demirors, 2011; Vasile & Pascu, 2005).

Recentemente, a poluição dos ecossistemas terrestres por microplásticos têm se tornado uma problemática central, principalmente em função do crescente número de resíduos plásticos gerados pela população mundial (Hernández-Arenas et al., 2021; Lian et al., 2020; Wang et al., 2020). Anualmente, estima-se que de 5 a 11 bilhões de toneladas de plásticos sejam produzidas, com uma quantidade significativa desta produção sendo depositada em aterros ou no ambiente (Hernández-Arenas et al., 2021; Lian et al., 2021). Ainda, é comum observarmos a contaminação por microplásticos ocorrer primordialmente no solo. Isto se dá pois os materiais plásticos utilizados no dia a dia são, comumente, descartados em aterros sanitários, sofrendo degradações físico-químicas até se tornarem micropartículas e, potencialmente, tornando-se modificadores da toxicidade e biodisponibilidade de poluentes e metais pesados no ambiente, em especial no contexto agrícola (Alvarez et al., 2020; Caixeta et al., 2022).

Dentre os principais alvos da contaminação por polietileno e microplásticos em geral, destacam-se as plantas. Elas frequentemente configuram o início da cadeia de bioacumulação, sofrendo de modo mais direto com a contaminação do solo e da água por materiais plásticos (Zhang et al., 2022). Isto também configura uma preocupação de impacto direto sobre o homem, em especial no que se refere à questão da agricultura, uma vez que o descarte indevido e degradação dos plásticos pode fazer com que suas partículas acabem nos nossos pratos (em função da bioacumulação previamente mencionada), podendo trazer efeitos como danos aos sistemas reprodutivo, digestivo e nervoso, citotoxicidade, genotoxicidade, estresse e dano oxidativo, entre outros. (Loganathan & Kizhakedathil, 2022; Yin et al., 2021). Contudo, o impacto de tais microplásticos ainda é pouco estudado nos organismos vegetais.

Como seres dependentes da qualidade do solo, as plantas são organismos chave no estudo do impacto de contaminações biológicas no ambiente terrestre. Na fisiologia vegetal, são

avaliados múltiplos parâmetros para determinar o grau de impacto destes contaminantes. Um deles é o estresse fisiológico sobre o desenvolvimento. Nesses experimentos, são analisadas diversas culturas, destacando-se as frutíferas, como a berinjela, a pimenta e o tomate, graças à sua susceptibilidade a variações ambientais e bioacumulação por contaminantes.

O tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) é uma espécie herbácea perene comumente cultivada comercialmente. De origem andina, este cultivar se destaca no mercado por seu ciclo curto e rendimento elevado, trazendo boas perspectivas comerciais para os produtores. Ademais, sua alta concentração de aminoácidos essenciais, vitaminas B e C, fósforo e ferro de seus frutos o torna muito apreciado pelo público em geral, movimentando anualmente, no Brasil, quase 10 bilhões de reais (IBGE, 2024). Os tomateiros são bons modelos vegetais para estudos fisiológicos de espécies frutíferas, por apresentarem ciclo de vida curto, alta produtividade, grande número de cultivares disponíveis, protocolos padronizados de manejo e possibilidade de cultivo controlado (Carvalho et al., 2011; Liu et al., 2022).

Diante dos panoramas supracitados, contudo, é ínfimo o número de experimentos fisiológicos visando acessar e compreender o impacto de microplásticos como o polietileno no desenvolvimento e ciclo de vida do tomateiro. Ainda, é importante estudar o impacto dos poluentes no desenvolvimento destas plantas como uma ferramenta aliada à agricultura e à produção de alimentos. Assim, urge a necessidade de avaliar os efeitos de diferentes dosagens do polietileno sobre o desenvolvimento de espécies vegetais frutíferas, destacando-se, em especial, o *Solanum lycopersicum* L., por se tratar de uma planta modelo. Para tanto, este estudo teve como objetivo responder às seguintes perguntas: quais os impactos do polietileno sobre o desenvolvimento de *Solanum lycopersicum* L.? Há uma correlação entre a concentração desse material e o nível de estresse observado pelos cultivares? A hipótese geral do trabalho é a de que quanto maior a presença de microplásticos no substrato, maiores serão os impactos deletérios na fisiologia do tomateiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Quantificar os efeitos da presença de fibras de microplástico de polietileno em substrato sobre o desenvolvimento de tomateiros (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom).

2.2 Específicos

- Determinar um possível efeito dose-resposta de diferentes concentrações de microplástico sobre o crescimento do tomateiro;
- Avaliar os impactos da exposição às fibras de microplásticos nos aspectos associados à produtividade de frutos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O tomate e o cultivar Micro-Tom

Com origem no continente americano, especificamente na região andina da América do Sul, o tomate enquanto cultura apresenta suas raízes no período pré-colombiano (Jenkins, 1948; Landau et al., 2020). Evidências favorecem a hipótese de que o sítio de domesticação da espécie tenha se dado no sul do México, a partir do qual a planta passou a ser disseminada por todo o globo: em 1544, foi introduzido na Europa, e, posteriormente, se difundiu desta para a Ásia e África. (Naika et al., 2006; Rick, 1980). Já no Brasil, especula-se que a introdução da cultura do tomate se deu com a chegada dos colonos, padres e navegadores portugueses, a partir de cerca de 1600 (Madeira et al., 2008).

O tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) é uma planta pertencente à família Solanaceae, a qual engloba mais de 2000 espécies distintas, muitas das quais têm grande representatividade sociocultural e valor econômico, como as batatas, as berinjelas e as pimentas. Inicialmente classificado como *Lycopersicum esculentum*, análises morfológicas, moleculares e filogenéticas apoiaram sua inclusão no gênero *Solanum* L. (Knapp & Peralta, 2016).

Uma característica floral que destaca o tomateiro dos demais representantes do gênero *Solanum* é a coloração amarelada da corola, sendo compartilhada apenas com a espécie espinhosa *Solanum rostratum* D. (Knapp & Peralta, 2016). As flores são bissexuadas e regulares, com um diâmetro de cerca de 2 cm. No geral, o tubo da corola é curto, piloso e composto por 6 pétalas, apresentando um pistilo envolto por um tubo estaminal sólido (Rick, 1980). Seu método de reprodução predominante é a autopolinização (Salim et al., 2020). As folhas se encontram dispostas de forma helicoidal, com 15 a 50 cm de comprimento e 10 a 30 cm de largura, possuindo forma oval a oblonga e apresentando certa pilosidade. O fruto é uma baga carnosa e globular, com 2 a 15 cm de diâmetro e coloração amarelada a laranja-avermelhada (Naika et al., 2006).

O tomate é uma das hortaliças de maior importância socioeconômica do globo, sendo considerada a terceira mais produzida e comercializada mundialmente (Rocha, 2006). No Brasil, ela ocupa o segundo lugar, ficando atrás apenas da batata. Nacionalmente, sua produção se concentra nas regiões dos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Goiás e São Paulo - correspondendo a 80% do volume comercializado e tendo o último estado como responsável por 20% da produção total (Ferreira, 2021).

O Brasil se destaca no que se refere à produção global de tomate, ocupando o nono lugar mundialmente e o primeiro lugar dentre os países da América do Sul (Carvalho et al., 2014). Correspondendo a cerca de 16% do PIB produzido por hortaliças no país, o tomate contribui grandemente no setor socioeconômico através da geração de renda e empregos - empregando cerca de 300 mil pessoas apenas no setor agrícola (Reis et al., 2023).

Ademais, o fruto do tomateiro possui grande valor nutricional, sendo rico em vitaminas A, C e E e minerais como cálcio e potássio, bem como carotenóides e licopeno - potente antioxidante considerado um potente aliado na prevenção de cânceres e no fortalecimento do sistema imunológico (Rocha, 2006; Ferreira, 2021). De fato, seu baixo valor calórico, alto teor de fibras, baixo valor de açúcar em relação a outros frutos e abundância de minerais, vitaminas, fenóis e antioxidantes fazem do tomate um aliado excepcional da nutrição mundial (Dorais, Ehret & Papadopoulos, 2008; Gerszberg et al., 2015). Outrossim, seu ciclo curto e de relativamente baixo custo o tornam um grande recurso no combate à insegurança alimentar.

Recentemente, o tomateiro tem se destacado no âmbito acadêmico, servindo como uma planta modelo para estudos botânicos e ecofisiológicos. Isto se dá por um número de peculiaridades, como, por exemplo, o fato de seu genoma já ter sido previamente sequenciado e o seu relativamente curto ciclo de vida, fatores que o tornam uma espécie de fácil manipulação e investigação científica (Gerszberg et al., 2015).

A presença de vários metabólitos importantes torna o tomate um modelo fulcral para a elucidação de questões relacionadas ao acúmulo e às vias de produção de tais metabólitos. Além disso, seu genoma compacto e já sequenciado o torna especialmente valioso no que se refere à questão da engenharia genética (Ezura, 2009). Ainda, características morfológicas e fisiológicas como um fruto carnoso climatérico, capacidade de associação com fungos micorrízicos e padrão morfogenético similar à maioria das angiospermas o tornam um modelo alternativo à também comum *Arabidopsis thaliana* L. (Alves, 2015).

Dentre os principais genótipos e variedades de plantas utilizados para fins científicos, destaca-se o Micro-Tom, uma variedade anã de tomateiro obtida através do cruzamento entre os cultivares Florida Basket e Ohio 4013-3 (Martí et al., 2006). Produzido originalmente para fins ornamentais, o cultivar Micro-Tom se tornou um modelo exemplar comumente utilizado para investigações biotecnológicas e estudos fisiológicos em plantas frutíferas (Carvalho et al., 2011). Isto se dá por uma série de características-chave encontradas em tal cultivar, dentre as quais se destacam: a possibilidade de cultivo sob condições variadas, curto ciclo de vida, porte pequeno, habilidade de produção de sementes, genoma compacto, altas fertilidade e homozigose e capacidade de propagação assexuada (Gerszberg et al., 2015; Kobayashi et al., 2014).

3.2 Plásticos, microplásticos e o polietileno

Quimicamente, são chamados de plásticos aqueles materiais poliméricos sintéticos dotados de maleabilidade, os quais são, majoritariamente, obtidos artificialmente a partir do petróleo, tendo sido, durante alguma fase de sua produção, transformados em fluido e adequados à moldagem por função do calor ou da pressão, tornando-se sólidos em sua condição final (Piatti & Rodrigues, 2005).

Para a criação de tais polímeros, o petróleo é aquecido sob condições controladas e quebrado em pequenas moléculas chamadas monômeros. Estas são a base para a construção de um polímero e suas diferentes combinações conferem ao produto final suas características únicas, como o grau de maleabilidade e resistência (Halden, 2010).

Em geral, os plásticos derivados do petróleo podem ser classificados em duas categorias principais de acordo com sua fusibilidade: termoplásticos e termorrígidos (Negrini, 2021). Os termoplásticos são aqueles cujas moléculas são unidas por vínculos fracos, criando plásticos capazes de amolecer quando expostos ao calor e retornar ao estado sólido com o resfriamento, caracterizando um material facilmente moldável. Alguns exemplos incluem o polietileno e o poliestireno. Já os termorrígidos são aqueles polímeros irreversivelmente definidos, ou seja, após o resfriamento, eles não são capazes de serem remodelados - sendo úteis por sua durabilidade e resistência. Dentre eles, destacam-se o poliuretano e a resina epóxi (Halden, 2010; Piatti & Rodrigues, 2005).

Em 1907, Leo Hendrik Baekeland criou o primeiro plástico sintético do registro histórico, o baquelite. E, apenas dois anos depois, em 1909, cunhou o termo “materiais plásticos” para se referir a produtos formados a partir de macromoléculas (Chalmin, 2019). Contudo, o uso de materiais plásticos tem um histórico ainda mais ancestral. Antes do “boom” na utilização de plásticos artificiais, em meados do século 20, a humanidade já utilizava de plásticos naturais para uma infinidade de propósitos. Na Roma antiga, por exemplo, o naturalista Plínio, o Velho descreveu, em sua obra, denominada *História Natural*, as propriedades de uma resina natural fossilizada: o âmbar (Gilbert, 2017).

Contudo, é inegável que, somente com a chegada da civilização contemporânea como a conhecemos, os plásticos começaram a se tornar mais relevantes no contexto social, com a expansão e difusão da produção em massa de plásticos sintéticos, em 1940 (Halden, 2010). Ademais, o desenvolvimento industrial nas décadas de 1930 e 1940 acarretou na produção de alguns dos plásticos mais comumente utilizados na contemporaneidade: poliestireno, PVC, PMMA, polietileno, entre outros (Gilbert, 2017).

Entre 1950 e 1970, a produção mundial de plásticos aumentou em mais de vinte vezes. Em 1946, por exemplo, os primeiros tupperwares surgiram como um símbolo do estilo de vida americano e foram difundidos mundialmente. Já em 1968, as primeiras garrafas plásticas foram produzidas e se tornaram elementos representativos do consumo mundial dos plásticos. Hoje, estudos preveem uma projeção de cerca de 600 milhões de toneladas métricas de itens plásticos até a metade do século 21 (Chalmin, 2019).

A indústria dos plásticos tem crescido exponencialmente nos últimos anos. Sua produção mundial passou de 1,5 milhão de toneladas em 1950 para 265 milhões de toneladas em 2010, com um pico ainda maior na produção em 2007. Atualmente, o maior produtor mundial de plásticos é a China, com cerca de 60 toneladas métricas, seguida pela União Europeia (com 57 Mton) e pela América do Norte (55 Mton) (Magrini et al., 2012). Em termos econômicos, mundialmente, o valor do mercado de plásticos chegou a quase 610 bilhões de dólares, em 2022, com previsões de aumentos consideráveis no consumo e produção de materiais plásticos nas indústrias têxtil, automotiva, eletroeletrônica, etc. (Viana, 2023).

O histórico da produção dos plásticos no Brasil não é recente. De fato, historicamente, ela começa a ganhar destaque com a industrialização pós Segunda Guerra Mundial (Schlickmann, 2015). Porém, mais recentemente, apenas entre 2018 e 2022, foi registrado um aumento significativo (de quase 1%) no setor de produção de plásticos no Brasil. Outrossim, no que se refere à questão do índice de vendas de produtos plásticos, houve um aumento de 0,5% no mesmo período. Já no setor das exportações, observa-se um crescimento de mais de 35%, enquanto as importações também apresentaram um aumento (especificamente, de 20%) (Viana, 2023).

A poluição por plásticos é uma realidade global. Nos últimos 70 anos, estima-se que um valor total de mais de 6 bilhões de toneladas de resíduos plásticos foi produzido - do qual menos de 10% foi reciclado, enquanto quase 80% do total foi descartado em aterros sanitários ou na natureza (Rhodes, 2018).

Apenas nos oceanos, há relatos de contaminação por resíduos plásticos há mais de meio século (Macleod et al., 2021). Esta realidade é especialmente relevante haja vista que organismos aquáticos são especialmente vulneráveis aos efeitos da poluição por plásticos nos oceanos, estando sujeitos à sua ingestão, ao emaranhamento e até à exposição a substâncias químicas secundárias (Obebe & Adamu, 2020).

Ainda, em 70 anos (de 1950 a 2020), a produção anual global de plásticos saiu de 5 milhões de toneladas métricas para mais de 350 milhões. Correlativamente, estimativas indicam

que, até 2040, a poluição por plásticos no globo triplicará (Napper & Thompson, 2023). E as repercussões desta contaminação podem ser sentidas no meio ambiente como um todo, desde os solos aos mares e geleiras e até mesmo na atmosfera. Desta forma, este cenário preocupante demanda mudanças de hábitos globais e a promoção de campanhas e medidas de prevenção.

Há muitos tipos de plásticos em produção no globo. Dentre eles, destaca-se uma variedade principal: o polietileno. Exaltado por possuir relevantes propriedades como baixo preço, alta capacidade de insulação elétrica, boa resistência química, boa processabilidade, flexibilidade e transparência, o polietileno se destaca, ainda, por sua estrutura simples e por possuir a maior tonelagem entre quaisquer materiais plásticos conhecidos (Ronca, 2017).

O polietileno recebe um nome bastante literal: ele é um polímero de etileno obtido através da polimerização por adição. Inicialmente descrito em 1933 por Reginald Gibson e Eric Fawcett, o polietileno continua a ganhar destaque mesmo mais de 90 anos após sua descoberta inicial, constituindo, atualmente, mais de um terço da participação do mercado global de produtos termoplásticos (Ronca, 2017; Vasile & Pascu, 2005). Ademais, sua alta aplicabilidade no dia a dia o torna um dos plásticos mais relevantes dos pontos de vista econômico e social, sendo utilizado na produção de embalagens, eletroeletrônicos, bens domésticos, etc. (Demirors, 2011).

Os resíduos plásticos podem ser classificados conforme sua granulometria. Os chamados microplásticos correspondem àqueles fragmentos de tamanho inferior a 5 mm e superior a 100 µm (Ullah et al., 2021). Os microplásticos podem, ainda, ser classificados conforme sua forma, podendo apresentar formato de microesferas, fibras, fragmentos e pelotas (Tirkey & Upadhyay, 2021). De acordo com sua origem, podem ser também classificados como primários e secundários.

Os microplásticos constituem grande parte do problema central da poluição sobre o meio ambiente: microplásticos primários (produzidos intencionalmente pela indústria) e secundários (aqueles obtidos através da fragmentação de plásticos maiores) têm sido registrados na natureza, com uma estimativa de cerca de 50 trilhões de micropartículas plásticas presentes apenas nos oceanos (Tirkey & Upadhyay, 2021).

A presença de tais microplásticos no ambiente natural é altamente preocupante devido aos seus resultados nos aspectos fisiológicos e químicos do meio e dos organismos que nele se encontram. Efeitos biológicos da contaminação e da poluição por microplásticos incluem: exposição a químicos e aditivos presentes na constituição dos plásticos, contágio por organismos patogênicos associados, emaranhamento e ingestão e a bioacumulação (Hale et al., 2020).

3.3 Os microplásticos como estressores na fisiologia vegetal

Uma vez no ecossistema, os microplásticos tendem a fragmentar, persistir, acumular e, de modo geral, perturbar a biota como um todo - causando desdobramentos negativos como a alteração das propriedades físico-químicas do solo, a bioacumulação na cadeia trófica e a redução do crescimento e desenvolvimento dos organismos afetados, especialmente os vegetais (Jia et al., 2023).

O primeiro efeito referente ao estresse por microplásticos em plantas é a inibição da germinação. Por ser a primeira fase do desenvolvimento vegetal, a germinação é uma etapa especialmente suscetível a estresses. Os microplásticos atuam entupindo os poros da testa das sementes, reduzindo drasticamente a absorção de água e, conseqüentemente, o processo de embebição (Jia et al., 2023).

Em segundo lugar, as raízes também caracterizam um órgão vegetal especialmente vulnerável ao estresse por microplásticos. A bioacumulação nas raízes - causada em função de sua atividade principal: a absorção de solutos - pode levar a uma redução no alongamento e atividade da raiz, bem como a redução da biomassa fresca e seca. Ademais, o bloqueio dos poros das raízes, bem como a perturbação do desenvolvimento dos pelos radiculares, pode reduzir drasticamente a absorção de água e nutrientes do solo, levando à redução do crescimento deste órgão. Por último, a exposição prolongada aos microplásticos pode acarretar em danos físicos e aumento do estresse oxidativo da raiz (Jia et al., 2023; Roy et al., 2022).

Os microplásticos também podem adentrar o corpo vegetal através da rota apoplástica do xilema, a partir da qual serão distribuídos por todo o sistema vegetal, culminando na bioacumulação nas folhas e frutos (Roy et al., 2022). Outrossim, a presença de microplásticos nas folhas reduz o alongamento celular e afeta diretamente o fornecimento de nutrientes, acarretando em dano fisiológico aos vasos do xilema e redução da produção de biomassa foliar (Jia et al., 2023).

As diferentes configurações em que se encontram os microplásticos também podem afetar diferentemente a fisiologia das plantas. Filmes plásticos, por exemplo, podem promover a evaporação de água no solo, favorecendo o surgimento de sintomas de deficiência por estresse hídrico nos vegetais. Já partículas com bordas afiadas podem, potencialmente, acarretar pesados danos mecânicos à estrutura das raízes e dos vasos condutores. Ainda, microplásticos fibrosos podem enredar as raízes de plantas jovens, comprometendo seu desenvolvimento (Elbasiouny et al., 2022). Curiosamente, a presença do polietileno em formatos de microesferas no solo pode

acarretar um resultado curioso na fisiologia dos cultivares: o aumento significativo do diâmetro do caule (Bouaicha et al., 2022).

Os microplásticos também podem acarretar uma influência negativa no desenvolvimento de organismos vegetais através da mudança dos atributos do substrato. A presença de fibras plásticas altera intrínseca e diretamente a qualidade e as propriedades do solo: uma concentração de até 2% de partículas de microplásticos, como o poliestireno ou o polietileno de alta densidade, pode promover a redução da densidade aparente do substrato. Ainda, fibras plásticas largas em concentrações superiores a 0,2% também podem reduzir a estabilidade e porosidade do substrato, além de minimizar a compactação do solo (Joos & De Tender, 2022). A soma destes cofatores impacta diretamente a disponibilidade de água no solo, promovendo um estado similar a condições de déficit hídrico.

A presença de fibras de microplásticos também está associada à promoção de pontos de fratura nos agregados do solo, aumentando diretamente o número e tamanho dos poros presentes no substrato e favorecendo, desta forma, a perda de água e redução da produtividade. Este efeito é ainda mais significativo em solos argilosos do que em solos arenosos. Isto se dá pois, em solos de textura argilosa, formam-se agregados maiores com grandes poros - potencializando, consequentemente, a evaporação (Krehl et al., 2022). A presença de microplásticos em formato de fibras, especialmente, reduz consistentemente - em cerca de 30% - a estabilidade dos agregados do solo, independentemente da concentração e da classe do polímero. Ademais, a presença dos plásticos também afeta diretamente a microbiota do solo, comprometendo a presença, abundância e riqueza da comunidade edáfica de bactérias - organismos fulcrais à manutenção da agregação do solo -, bem como a saúde de macrorganismos como minhocas e nematódeos - animais intrinsecamente relacionados à dinâmica de agregação do substrato terrestre (Lozano et al., 2021; Rillig et al., 2019). De forma geral, a presença das partículas plásticas associadas ao substrato acarreta um efeito inibitório significativo na estabilidade dos agregados do solo em função da capacidade de tais microplásticos se vincularem às partículas do solo, alterando suas características e nuances químicas, físicas e biológicas, bem como suas dinâmicas de agregação (Guttula, 2023). Ainda, a densidade aparente do solo é funcionalmente alterada pela presença de partículas plásticas, sendo, virtualmente, reduzida (Qiu et al., 2022; Rillig et al., 2019).

Adicionalmente, de forma mais alarmante, verifica-se que, em função da grande hidrofobicidade característica dos materiais plásticos, a quantidade de água mantida em reserva no solo, em especial nos poros de pequena escala, tende a ser minimizada na presença de microplásticos - o que repercute diretamente em parâmetros como a condutividade hidráulica do

substrato, bem como a convecção de solutos. De forma geral, a presença de microplásticos no solo tem a capacidade de ressoar negativamente na concentração de umidade no solo (Qiu et al., 2022; Rillig et al., 2019).

No que se refere especialmente ao polietileno e suas repercussões no solo e no desenvolvimento de cultivares vegetais, as propriedades químicas desse plástico são um elemento-chave da alteração das dinâmicas edáficas. Em função de sua altíssima hidrofobicidade, advinda de uma estrutura polimérica de cadeia longa saturada com ligações de etileno, o polietileno demonstra propriedades intensamente apolares. Isso acarreta a indução da repelência da água no solo, limitando o fluxo capilar, além de potencializar a evapotranspiração e reduzir a disponibilidade hídrica no sistema. A soma destes fatores influencia diretamente o desenvolvimento vegetal ao interferir nas relações hídricas das plantas, levando a respostas bioquímicas e fisiológicas como a potencialização do estresse oxidativo e o aumento do calibre dos vasos condutores (Qiang et al., 2023; Machado et al., 2019). O polietileno também desencadeia um efeito peculiar: a adesão potencializada de micropartículas plásticas às superfícies dos vegetais - o que, quando ocorrente nos poros das raízes, pode acarretar o bloqueio de tais poros e a consequente promoção da dificuldade na absorção de água (Ceccanti et al., 2024; Mateos-Cárdenas et al., 2019).

Contudo, a presença do polietileno no solo parece não ser um fator exageradamente comprometedor à fisiologia das plantas, em especial no que se refere à cultura do tomate, não acarretando diferenças significativas na alocação de biomassa (Ceccanti et al., 2024; Colzi et al., 2022; Dainelli et al., 2023; Guttula, 2023; Lee & Kim, 2001; Mateos-Cárdenas et al., 2019; Meng et al., 2021; Sahasa et al., 2023; Shorobi et al., 2023; Wang et al., 2020). O tamanho das partículas também caracteriza um fator importante para a promoção do estresse por microplásticos: partículas de maiores calibres podem não ter influência direta nos fatores de crescimento e na alocação de biomassa do tomate (Shi et al., 2022).

Em conclusão, a presença dos microplásticos no ecossistema caracteriza uma problemática central de extrema relevância no contexto agrônômico contemporâneo, afetando diretamente as dinâmicas edáficas, bem como a produtividade e qualidade dos vegetais afetados. Contudo, o grau de fitotoxicidade, tal qual o nível de estresse observado sobre as culturas vegetais, podem estar relacionados diretamente à forma, ao tipo e à quantidade de tais microplásticos no solo e, também, ao tipo da cultura vegetal. Desta forma, urge a necessidade de novos estudos ecofisiológicos para determinar o grau de intervenção dos microplásticos, levando em conta todos os parâmetros supracitados, sobre a fisiologia das diferentes espécies vegetais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização do experimento e condições de cultivo

O experimento foi conduzido por três meses dentro da câmara climática do Laboratório de Fisiologia e Evolução de Plantas (LaFiEP), localizado no Departamento de Sistemática e Ecologia (DSE) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em João Pessoa na Paraíba, sob condições controladas de cultivo: o fotoperíodo foi dividido em dia/noite com 12h de duração cada, a temperatura foi ajustada para 25°C durante o dia e 18°C durante a noite e a umidade média selecionada foi de 60% durante o dia e 70% durante a noite.

4.2 Preparo do substrato e cultivo dos micro-tomateiros

Para a obtenção das plântulas utilizadas no experimento, os micro-tomateiros foram semeados em bandejas de germinação contendo substrato comercial para a germinação (Bioplant®) e, após sete dias, com a emergência das primeiras folhas não-cotiledonares, elas foram transferidas para vasos com o substrato experimental.

Para a obtenção do substrato utilizado durante a experimentação, foram incorporados mecanicamente vermiculita, substrato comercial (Bioplant®) e vermicomposto comercial (EMPASA®) em uma proporção 5:4:1, respectivamente. Após a homogeneização do substrato, para a correção nutricional e de acidez, foram adicionados 2g/kg de NPK e 4g/kg de calcário - que foram, subsequentemente, incorporados manualmente até obter um substrato homogêneo. A constituição e correção nutricional do substrato seguiram protocolos pré-estabelecidos para a cultura do tomate. Posteriormente, foram separadas porções de substrato para a adição das fibras de polietileno de cada tratamento (T1, controle sem microplásticos adicionados, T2, 0,6% de fibras de polietileno m/m, e T3, 2,4% m/m), que foram misturadas mecanicamente no solo até sua homogeneização.

Finalmente, para o transplântio das mudas, foram utilizados vasos plásticos com capacidade para 550mL, com a base furada para permitir a absorção de água pelo solo e raízes. A abertura dos sulcos para a transferência das plântulas da bandeja de germinação para os vasos foi executada manualmente com uma profundidade de aproximadamente 5cm.

Menos de uma semana após o transplântio, contudo, uma das repetições do tratamento controle (T1R2) não seguiu com vigor suficiente e adentrou estado de murcha permanente. Com isto, ela foi desconsiderada no experimento e nas análises estatísticas.

4.3 Condução do experimento

Para a irrigação dos micro-tomateiros, foram preenchidas bandejas plásticas (nas quais se situavam os vasos) com uma fina lâmina de água a fim de possibilitar a absorção pelas raízes. A água era repostada sempre que a bandeja secasse completamente e o solo dos vasos começasse a secar a fim de evitar estresse por perda ou excesso de água, mantendo o substrato sempre úmido e arejado.

Quanto à adubação, foi utilizado, pouco antes do período de formação dos frutos, um adubo foliar comercial da marca Forth® (Solução de Peters 20-20-20) diluído em água em uma proporção de 2g/L. O produto foi pulverizado na parte abaxial das folhas.

4.4 Variáveis analisadas

Três meses após o transplantio dos micro-tomateiros e início do experimento, com o final do ciclo da cultura, foram avaliados os parâmetros de crescimento das plantas. Foram mensurados o diâmetro do caule, a massa seca de parte aérea, a massa seca de raízes e a massa seca de frutos. O diâmetro do caule foi medido com auxílio de um paquímetro digital na base do caule, a cerca de 1cm acima do nível do solo. Logo após a avaliação deste parâmetro, os frutos foram colhidos e separados por indivíduo e todo o material vegetativo foi retirado dos potes. As raízes foram lavadas completa e cuidadosamente sob água corrente a fim de retirar quaisquer partículas de solo e garantir a aferição correta do peso. Em seguida, foram separadas as partes aérea e de raiz de cada planta, com auxílio de uma tesoura, realizando-se um corte na base dos caules. Os materiais foram devidamente alocados em saquinhos de papel padronizados e marcados com as siglas correspondentes aos tratamentos (T1, T2 e T3), repetições (N1 ao N7) e órgãos (caule, folhas, raízes e frutos). Por último, os materiais foram levados a uma estufa com circulação de ar a 65°C, onde ficaram por uma semana até atingir o peso constante. Finalmente, após a secagem, foram aferidos os pesos correspondentes às massas do caule, raiz e frutos, com auxílio de uma balança de precisão.

4.5 Delineamento experimental e análises estatísticas

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado com três tratamentos - obtidos através do resultado da adição de diferentes concentrações de microfibras de polietileno ao solo (T1 controle, T2 0,6% e T3 2,4%) - e sete repetições, totalizando 21 amostras e utilizando uma planta por pote. Os dados obtidos foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e

posterior teste de Tukey a um nível de significância de 5% por meio da utilização do software estatístico JMP Pro 17® (<http://www.jmp.com>).

5 RESULTADOS

5.1 Massa seca de folhas

Conforme a Figura 1A e as análises estatísticas (ANOVA), em relação à massa seca de folhas, nenhum dos tratamentos experimentais apresentou diferenças significativas em relação ao tratamento controle ($p = 0,9793$; $F = 0,0209$), indicando que, para o experimento em questão, a presença de fibras de microplásticos no substrato não comprometeu a alocação de biomassa nas folhas de micro-tomateiros.

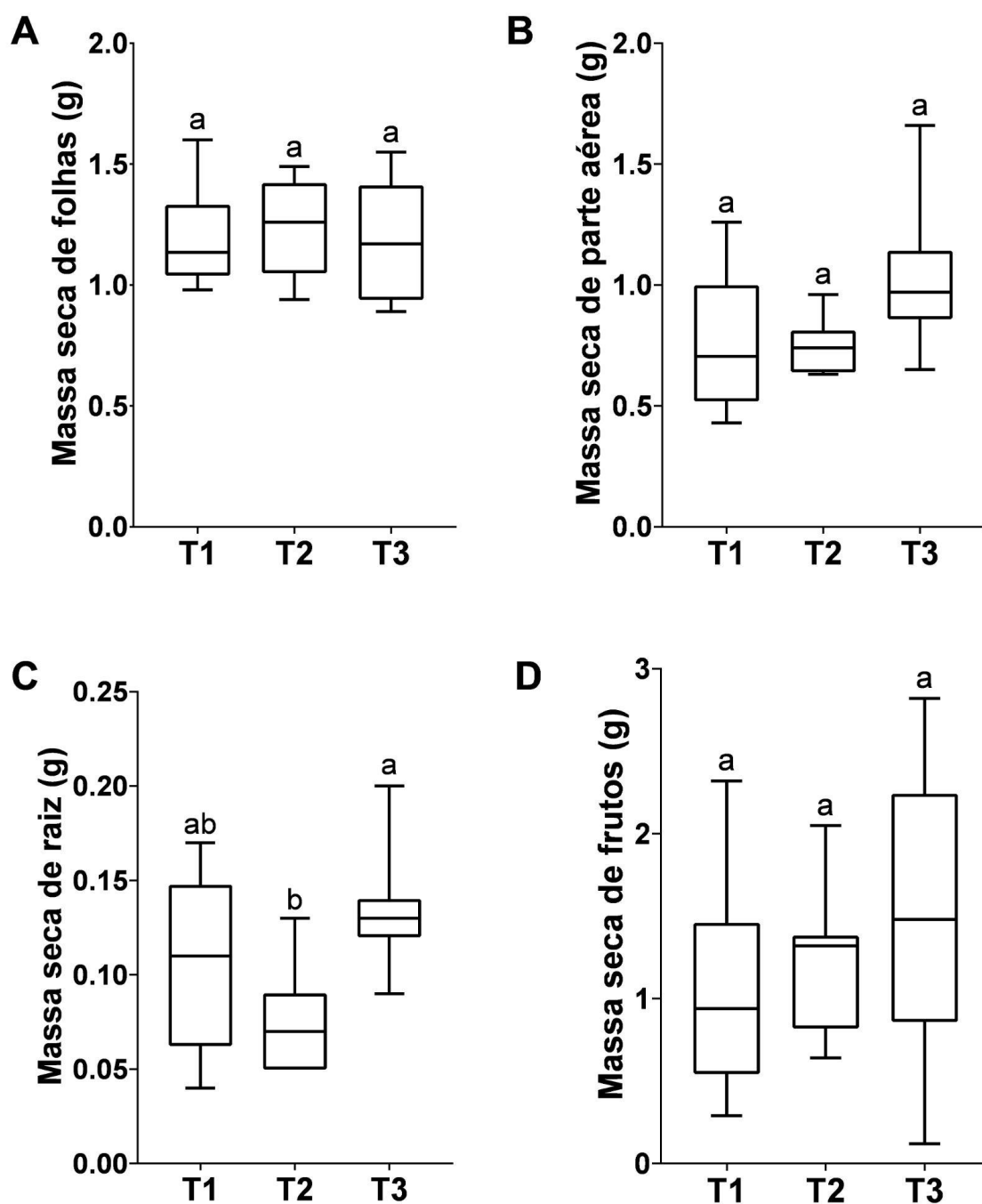


Figura 1. Partição de biomassa seca em órgãos de micro-tomateiros submetidos a diferentes concentrações de microfibras de polietileno no substrato. A) Massa seca de folhas em gramas, B) Massa seca de parte aérea em gramas, C) Massa seca de raiz em gramas, D) Massa seca de frutos em gramas. T1: tratamento controle (sem microfibras de polietileno), T2: tratamento contendo 0,6% de microfibras de polietileno no substrato, T3: tratamento contendo 2,4% de microfibras de polietileno no substrato. Os dados estão representados como boxplots, sendo as caixas correspondentes ao intervalo interquartil e as extremidades das barras, aos valores máximos e mínimos. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

5.2 Massa seca de caules

Similarmente aos resultados supracitados, com as análises estatísticas (ANOVA) e a Figura 1B, a variável da massa seca de parte aérea, em relação ao grupo controle, não apresentou diferenças significativas em nenhum tratamento ($p = 0,1150$; $F = 2,4634$). Desta forma, é possível inferir que a presença dos microplásticos no substrato não teve influência na alocação de biomassa no caule dos vegetais.

5.3 Massa seca de raiz

Em relação à variável da massa seca de raiz, a análise de variância detectou uma diferença significativa entre os tratamentos ($p = 0,0295$; $F = 4,3679$) (Figura 1C). O posterior teste de Tukey ($q = 2,56536$) revelou que há diferença entre as médias dos tratamentos T2 e T3 ($p = 0,0229$), podendo significar um efeito decorrente da exposição das raízes aos microplásticos no substrato.

5.4 Massa seca de frutos

Os resultados da ANOVA revelaram que não houve interferência significativa dos tratamentos sobre a massa seca de frutos ($p = 0,6134$; $F = 0,5031$) (Figura 1D). Desta forma, nota-se que a presença dos microplásticos no substrato não teve impacto sobre o desenvolvimento e o aporte de fotoassimilados destinado aos frutos.

5.5 Diâmetro de caule

Com relação à variável do diâmetro de caule (Figura 2), as análises estatísticas apontaram uma influência crescente da concentração de microplásticos de polietileno sobre os resultados obtidos. A ANOVA constatou a interferência dos tratamentos sobre o diâmetro de

caule ($p = 0,0001$; $F = 16,0890$), enquanto o teste de Tukey confirmou que T3 difere substancialmente de T1 e T2, ($q = 2,56536$), sendo o T3 25% maior do que o T1.

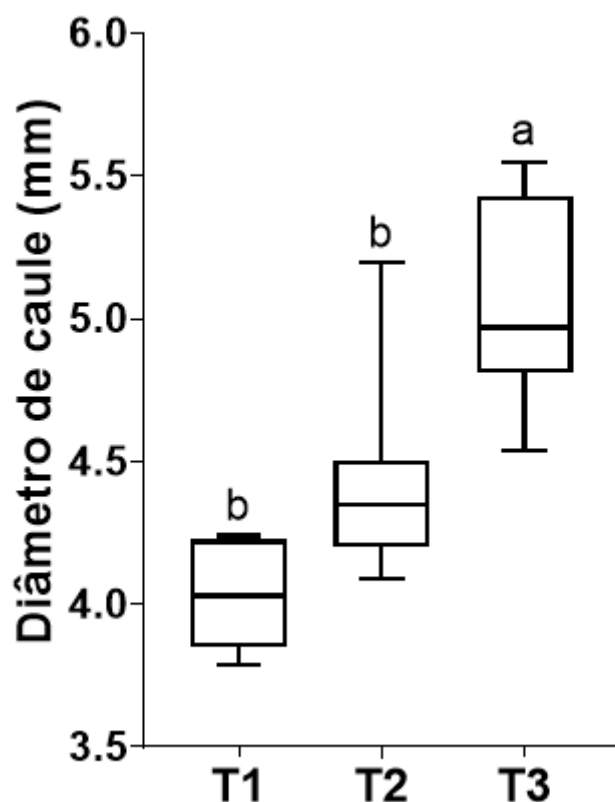


Figura 2. Diâmetro do caule (em milímetros) de micro-tomateiros submetidos a diferentes concentrações de microfibras de polietileno no substrato. T1: tratamento controle (sem microfibras de polietileno), T2: tratamento contendo 0,6% de microfibras de polietileno no substrato, T3: tratamento contendo 2,4% de microfibras de polietileno no substrato. Os dados estão representados como boxplots, sendo as caixas correspondentes ao intervalo interquartil e as extremidades das barras, aos valores máximos e mínimos. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

6 DISCUSSÃO

No presente estudo, foi realizada a análise dos efeitos da presença de fibras de polietileno no solo sobre o desenvolvimento do tomateiro, enfatizando as consequências observadas na fisiologia e produtividade das plantas frutíferas. Observou-se, a partir desta abordagem, que as repercussões associadas à presença das microfibras (até a uma concentração de 2,4% no substrato) sobre a fisiologia do tomateiro foram ínfimas, não afetando diretamente quaisquer parâmetros associados à alocação de biomassa ou à produtividade de frutos. Contudo, observou-se o aumento proporcional do diâmetro do caule em relação ao acréscimo da concentração de microplásticos no solo, revelando um possível efeito dose-resposta sobre este parâmetro.

Não foram observadas diferenças no aporte de fotoassimilados direcionado à massa dos vegetais, obtendo valores similares de massa seca de folhas, parte aérea, raiz e frutos entre os tratamentos. Isto revela que, possivelmente, a presença de microplásticos de polietileno em formato de fibras no solo não tenha efeitos severos sobre a fisiologia do tomateiro nas concentrações avaliadas. Esta hipótese é reforçada pelos trabalhos de Mateos-Cárdenas et al. (2019), Lee & Kim (2001), Dainelli et al. (2023), Ceccanti et al. (2024), Colzi et al. (2022), Sahasa et al. (2023), Meng et al. (2021), Wang et al. (2020), Shorobi et al. (2022) e Guttula (2023), que observaram que o polietileno, em tamanhos, formas e concentrações similares às utilizadas neste estudo, não apresenta impactos sobre o acúmulo de biomassa em diferentes culturas frutíferas, sobretudo o tomateiro.

Em uma análise mais criteriosa, conforme os dados obtidos por este trabalho, observou-se que os parâmetros associados à alocação de biomassa, no tomateiro, não foram alterados significativamente pelos tratamentos com microplásticos. Isto pode ocorrer pois o tomateiro pode ser uma espécie especialmente resistente a este tipo de estressor, uma vez que concentrações variando entre 1% a até 5% de polietileno no solo não causaram prejuízos à alocação de biomassa em tomateiro (Lee & Kim, 2001; Sahasa et al., 2023; Shorobi et al., 2022).

O polietileno também parece não ter uma fitotoxicidade tão alta mesmo para outras plantas, uma vez que para a abobrinha em concentrações de até 0,2% (Colzi et al., 2022) e para o feijão exposto a concentrações de até 2,5% no solo (Meng et al., 2021), efeitos significativos não foram observados. Ainda, mesmo em concentrações de 10% de microplásticos no solo, consideravelmente maiores do que as atualmente registradas para a maioria dos solos cultivados

(Machado et al., 2019), alterações no acúmulo de biomassa em milho também não foram significativas (Wang et al., 2020).

O diâmetro de caule dos tomateiros, contudo, aumentou proporcionalmente ao incremento de microfibras de polietileno no solo. Esta resposta pode ser advinda da alteração nas dinâmicas de absorção de água do solo, promovida pelo bloqueio dos poros das raízes (Elbasiouny et al., 2023; Jia et al., 2023), bem como a promoção da hidrofobicidade do solo (Qiang, 2023; Qiu et al., 2022; Rillig et al., 2019) e a redução da disponibilidade hídrica advinda da alteração dos parâmetros biológicos, físicos e químicos do solo (Joos & Detender, 2022; Krehl et al., 2022; Lozano et al., 2021). De forma geral, pôde-se inferir que, possivelmente, a presença dos microplásticos no solo promoveu a alteração das dinâmicas hídricas no sistema solo-planta através da redução da disponibilidade de água no solo, promoção da perda de água do substrato e favorecimento do bloqueio dos poros das raízes, levando a uma condição de estresse hídrico moderado, favorecendo o aumento do calibre dos vasos condutores a fim de compensar a baixa disponibilidade e absorção de água. Essa hipótese já foi levantada também em estudos para morangueiro, nos quais a adsorção dos plásticos de polietileno em pó às superfícies radiculares desta frutífera resultou em danos substanciais às estruturas radiculares, alterando as dinâmicas hídricas através do impedimento da absorção plena de água (Ceccanti et al., 2024).

Diante dos argumentos supracitados, podemos inferir que, provavelmente, a alteração na dinâmica de absorção de água pela raiz, ocasionada pela alteração das dinâmicas do solo e pelo acúmulo de microplásticos nos poros da raiz, bem como sua ação comprometedora da estrutura radicular, teve repercussões diretas na fisiologia dos tomateiros. Foi observado um aumento no diâmetro de caule proporcional ao aumento de microplásticos no solo, o que pode ter ocorrido como uma forma de maximizar a absorção de água e nutrientes através do aumento do calibre dos vasos condutores. Contudo, os parâmetros de alocação de biomassa não foram alterados significativamente, revelando, em associação aos dados discutidos ao longo da discussão, que, possivelmente, o polietileno não possui efeitos deletérios tão severos diretamente sobre a fisiologia da cultura do tomate, porém seus efeitos podem advir da alteração da dinâmica das relações hídricas entre o solo e a planta. Diante deste cenário, faz-se necessário a promoção de novas pesquisas sobre a fisiologia do estresse por microplásticos sobre as culturas vegetais, em especial a do tomateiro, a fim de contribuir para a construção dos saberes e corroborar os dados obtidos no presente experimento.

7 CONCLUSÃO

A presença de fibras microplásticas de polietileno no solo não alterou significativamente os parâmetros associados à alocação da biomassa no tomateiro, independentemente das concentrações aplicadas, obtendo resultados similares para a massa seca de folhas, caule, raiz e frutos entre todos os tratamentos. Isto pode ter ocorrido pois o polietileno aparenta não possuir efeitos deletérios tão severos sobre as culturas vegetais, sobretudo o tomateiro. Contudo, observou-se, adicionalmente, o aumento progressivo do diâmetro de caule em resposta ao acréscimo de microplásticos no solo, um sinal do efeito estressor moderado dos microplásticos. Uma possível explicação para este fenômeno é a alteração das dinâmicas hídricas entre solo e planta na presença dos microplásticos, levando os espécimes a aumentarem o calibre dos vasos condutores a fim de potencializar a absorção de água e nutrientes.

REFERÊNCIAS

AL-HUQAIL, A. A.; ALGHANEM, S. M. S.; ALHAITHLOUL, H. A. S.; SALEEM, M. H.; ABEED, A. H. A. **Combined exposure of PVC-microplastic and mercury chloride (HgCl₂) in sorghum (*Pennisetum glaucum* L.) when its seeds are primed titanium dioxide nanoparticles (TiO₂-NPs).** Environmental Science and Pollution Research, v. 31, p. 7837-7852, 2024.

ALVAREZ, L. D. G.; JESUS, F. B.; COSTA, A. P. L.; BASTOS, L. E. F.; SOUZA, D. A. M.; SILVA, D. G. **Efeitos dos microplásticos no ambiente: um macroproblema emergente.** Revista Ciencia y Tecnología, v. 33, p. 1-10, jun. 2022.

ALVES, F. R. R.; **Respostas bioquímicas e fisiológicas de mutantes fotomorfogenéticos de tomateiro (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom) sob deficiência hídrica.** Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal) - Universidade Federal de Goiás. Goiás. 2015.

AZEEM, I.; ADEEL, M.; AHMAD, M. A.; SHAKOOR, N.; JIANGCUO, G. D.; AZEEM, K.; ISHFAQ, M.; SHAKOOR, A.; AYAZ, M.; XU, M.; RUI, Y. **Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants: a critical review.** Nanomaterials, v. 11, n. p., nov. 2021.

BOUAICHA, O.; TIZIANI, R.; MAVER, M.; LUCINI, L.; MIRAS-MORENO, B.; ZHANG, L.; TREVISAN, M.; CESCO, S.; BORRUSO, L.; MIMMO, T. **Plant species-specific impact of polyethylene microspheres on seedling growth and the metabolome.** Science of Total Environment, v. 840, p. 156678, set. 2022.

CAIXETA, D. S.; MORAIS, E. B.; CAIXETA, F. C.; CAIXETA, I. M. S. **Microplásticos como indicadores de poluição ambiental e seus efeitos sobre organismos.** Enciclopédia Biosfera, v. 19, n. 40, jun. 2022.

CARVALHO, C. R. F.; PONCIANO, N. J.; SOUZA, P. M.; SOUZA, C. L. M.; SOUSA, E. F. **Viabilidade econômica e de risco da produção de tomate no município de Cambuci/RJ, Brasil.** *Ciência Rural*, v. 44, n. 12, p. 2229-2299, dez. 2014.

CARVALHO C. R. F.; CAMPOS, M. L.; PINO, L. E.; CRESTANA, S. L.; ZSÖGÖN, A.; LIMA, J. E.; BENEDITO, V. A.; PERES, L. E. P. **Convergence of developmental mutants into single tomato model system: ‘Micro-Tom’ as an effective toolkit for plant development research.** *Plant Methods*, v. 7, p. 1-14, 2011.

CECCANTI, C.; DAVINI, A.; LO PICCOLO, E.; LAURIA, G.; ROSSI, V.; CASTIGLIONE, M. R.; SPANÒ, C.; BOTTEGA, S.; GUIDI, L.; LANDI, M. **Polyethylene microplastics alter root functionality and affect strawberry plant physiology and fruit quality traits.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 470, p. 134164, mai. 2024.

CHALMIN, P. **The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock.** *Field Actions and Science Reports*, v. 19, p. 6-11, mar. 2019.

COLZI, I.; RENNA, L.; BIANCHI, E.; CASTELLANI, M. B.; COPPI, A.; PIGNATELLI, S.; LOPPI, S.; GONNELLI, C. **Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 432, p. 127238, fev. 2022.

DAINELLI, M.; PIGNATELLI, S.; BAZIHIZINA, N.; FALSINI, S.; PAPINI, A.; BACCELI, I.; MANCUSO, S.; COPPI, A.; CASTELLANI, M. B.; COLZI, I.; GONNELLI, C. **Can microplastics threaten plant productivity and fruit quality? Insights from Micro-Tom and Micro-PET/PVC.** *Science of Total Environment*, v. 895, p. 165119, out. 2023.

DEMIRORS, M. **The history of polyethylene.** *100+ Years of Plastic: Leo Baekeland and Beyond*, p. 115-145, nov. 2011.

DORAIS, M.; EHRET, D. L.; PAPADOPOULOS, A. P. **Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer.** *Phytochemistry Reviews*, v. 7, p. 231-250, fev. 2008.

ELBASIOUNY, H.; MUSTAFA, A. A.; ZEDAN, A.; AMER, S. M.; ALBEIALY, N. O.; ALKHARSAWEY, D. S.; AEASH, N. R.; ABUOMAR, A. O.; HAMD, R. E.; ELBLTAGY, H. M.; ELBANNA, B.; EL-SHAZLY, S. A.; DAWOUD, S. F. M.; EL-SADAWY, A. A.; SHARAF-ELDIN, A. M.; EBRAHIM, A. E. E.; DARWEESH, M. **Impact of Pollution by Microplastic on Soil, Soil Microbes and Plants and Its Remediation by The Biochar: A review.** Egypt. J. Soil Sci., v. 62, n. 4, p. 325-334, 2022.

EZURA, H. **Tomato is a Next-generation Model Plant for Research and Development.** J. Japan Soc. Hort. Sci., Japão, p. 1-2, 2009.

FERREIRA, M. C. C. **Cultivo de Tomate em Horta Urbana.** Monografia (Curso Técnico em Agropecuária) - ETEC Frei Arnaldo Maria de Itaporanga. Itaporanga. 2021.

GERSZBERG, A.; HNATSUZKO-KONKA, K.; KOWALCZYK, T.; KONONOWICZ, A. K. **Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the service of biotechnology.** Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), v. 120, p. 881-902. mar. 2015.

GILBERT, M. **Plastics Materials: Introduction and Historical Development.** Brydson's Plastic Materials, v. 8, p. 1-18. out. 2017.

GUTTULA, M. K. **Effects of microplastics on soil pH, electrical conductivity, and plant growth.** Thesis (Master of Science) - McGill University. Montreal, Quebec. 2023.

HALDEN, R. U. **Plastics and Health Risks.** Annu. Rev. Public Health, v. 31, p. 179-194. jan, 2010.

HALE, R. C.; SEELEY, M. E.; LA GUARDIA, M. J.; MAI, L.; ZENG, E. Y. **A Global Perspective on Microplastics.** JGR Oceans, v. 125, n. 1, jan. 2020.

HARTMANN, G. F.; RICACHENEVSKY, F. K.; SILVEIRA, N. M.; PITA-BARBOSA, A. **Phytotoxic effects of plastic pollution in crops: what is the size of the problem?**. *Environmental Pollution*, v. 292, p. 118420, 2022.

HATA, F. T.; SILVA, D. C.; YASSUNAKA-HATA, N. N.; CANCIAN, M. A. Q.; SANCHES, I. A.; POÇAS, C. E. P.; VENTURA, M. U.; SPINOSA, W. A.; MACEDO, R. B. **Leafy vegetables' agronomic variables, nitrate and bioactive compounds have different responses to bokashi, mineral fertilization, and boiled chicken manure**. *Horticulturae*, v. 9, n. 2, fev. 2023.

HERNANDÉZ-ARENAS, R.; BELTRÁN-SANAHUJA, A.; NAVARRO-QUIRANT, P.; SANZ-LAZARO, C. **The effects of sewage sludge containing microplastics on the growth and fruit development of tomato plants**. *Environmental Pollution*, v. 268, n. 2., jan. 2021.

HO, B. T.; ROBERTS, T. K.; LUCAS, S. **An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach**. *Critical reviews in biotechnology*, v. 39, n. 2., p. 308-320, ago. 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de Tomate no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/br>. Acesso em: 20 Jun. 2024.

JENKINS, J. A. **The origin of the cultivated tomato**. *Econ Bot*, v. 2, p. 379-392, out. 1948.

JIA, L.; LIU, L. ZHANG, Y.; FU, W.; LIU, X.; WANG, Q.; TANVEER, M.; HUANG, L. **Microplastic stress in plants: effects in plant growth and their remediations**. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, ago. 2023.

JOOS, L.; DE TENDER, C. **Soil under stress: The importance of soil life and how it is influenced by (micro)plastic pollution**. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, v. 20, p. 1554 - 1566, 2022.

KNAPP, S.; PERALTA, I. E. **The Tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) and Its Botanical Relatives**. The Tomato Genome, 1^a ed., p. 7-21, Springer, nov. 2016.

KOBAYASHI, M.; NAGASAKI, H.; GARCIA, V.; JUST, D.; BRES, C.; MAUXION, J.; PASLIER, M. L.; BRUNEL, D.; SUDA, K.; MINAKUCHI, Y.; TOYODA, A.; FUJIYAMA, A.; TOYOSHIMA, H.; SUZUKI, T.; IGARASHI, K.; ROTHAN, C.; KAMINUMA, E.; NAKAMURA, Y.; YANO, K.; AOKI, K. **Genome-Wide Analysis of Intraspecific DNA Polymorphism in ‘Micro-Tom’, a Model Cultivar of Tomato (*Solanum lycopersicum*)**. Plant and Cell Physiology, v. 55, n. 2, p. 445-454, fev. 2014.

KREHL, A.; SCHÖLLKOPF, U.; MÁJEKOVÁ, M.; TIELBÖRGER, K.; TOMIOLO, S. **Effects of plastic fragments on plant performance are mediated by soil properties and drought**. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 17771, 2022.

LANDAU, E. C.; HIRSCH, A.; MOURA, L.; SILVA, G. A.; GUIMARÃES, D. P. **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem vegetal**. Brasília, DF: Embrapa, v. 2, cap. 40, p. 1303-1327, mai. 2020.

LEE, J.; KIM, M. **Effect of Poly(Vinyl Alcohol) and Polyethylene on the Growth of Red Pepper and Tomato**. Journal of Polymers and the Environment, v. 9, no. 2, p. 91-95, abr. 2001.

LIAN, J.; LIU, W.; MENG, L.; WU, J.; CHAO, L.; ZEB, A.; SUN, Y. **Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.)**. Environmental Pollution, v. 280, jul. 2021.

LIAN, J.; WU, J.; XIONG, H.; ZEB, A.; YANG, T.; SU, X.; SU, L.; LIU, W. **Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.)**. Journal of Hazardous Materials, v. 385, mar. 2020.

LIMA, A. P. A. **Desempenho de rúcula submetida a frequências de irrigação e doses de hidrogel**. Dissertação (Mestrado em Irrigação do Cerrado - Instituto Federal Goiano). Goiás. 2022.

LIU, W.; K., LIU; D., CHEN; ZHANG, Z.; LI, B.; EL-MOGY, M. M.; CHEN, T. ***Solanum lycopersicum*, a model plant for the studies in developmental biology, stress biology and food science.** Foods, v. 11, n. 6; p. 2402, 2022.

LOGANATHAN, Y.; KIZHAKEDATHIL, M. P. J. **A review on microplastics - an indelible ubiquitous pollutant.** Biointerface Research in Applied Chemistry, v. 13, n. 2., p. 126, mar. 2022.

LOZANO, Y. M.; LEHNERT, T.; LINCK, L. T.; LEHMANN, A.; RILLIG, M. C. **Microplastic shape, polymer type and concentration affect soil properties and plant biomass.** Frontiers in plant science, v. 12, p. 616645, 2021.

MACHADO, .A A. S.; LAU, C. W.; KLOAS, W.; BERGMANN, J.; BACHELIER, J. B.; FALTIN, E.; BECKER, R.; GÖRLICH, A. S.; RILLIG, M. C. **Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance.** Environmental Science & Technology, v. 53, n. 10, p. 6044-6052, mai. 2019.

MACLEOD, M.; ARP, H. P. H.; TEKMAN, M. B.; JAHNKE, A. **The global threat from plastic pollution.** Science, v. 373, n. 6550, p. 61-65, jul. 2021.

MADEIRA, N. R.; REIFSCHNEIDER, F. J. B.; GIORDANO, L. B. **Contribuição portuguesa à produção e ao consumo de hortaliças no Brasil: uma revisão histórica.** Horticultura Brasileira, v. 26, p. 428-432, dez. 2008.

MAGRINI, A.; MELO, C. K.; JR., C. A. C.; GAIOTO, C. C.; SANTOS, D. P.; BORGES, G.; ROSA, I. S.; DELGADO, J. J. S.; PINTO, J. C.; SOUZA, M. N.; OLIVEIRA, M. C. B. R.; SOUZA, P. N.; JR., P. A. M.; ADERNE, R.; VASCONCELOS, S. M. R. **Impactos Ambientais causados pelos Plásticos: Uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos.** E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2012.

MARQUES, D. C. **Produção da berinjela (*Solanum melongena* L.) irrigada com diferentes lâminas e concentrações de sais na água.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras) Lavras, MG. 2003.

MARTÍ, E.; GISBERT, C.; BISHOP, G. J.; DIXON, M. S.; GARCÍA-MARTINEZ, J. L. **Genetic and physiological characterization of tomato cv. Micro-Tom.** Journal of Experimental Botany, v. 57, n. 9, p. 2037-2047, jun. 2006.

MATEOS-CÁRDENAS, A.; SCOTT, D. T.; SEITMAGANBETOVA, G.; VAN PELT, F. N. A. M.; O'HALLORAN, J.; JANSEN, M. A. K. **Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L.), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.).** Science of Total Environment, v. 689, p. 413-421, nov. 2019.

MENG, F.; YANG, X.; RIKSEN, M.; XU, M.; GEISSEN, V. **Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth to soil contaminated with microplastics.** Science of Total Environment, v. 755, p. 142516, fev. 2021.

MONTENEGRO, R. S. P.; SERFATY, M. E. **Aspectos gerais do poliestireno.** BNDES Setorial, Set. 2002.

NAIKA, S.; JEUDE, J. L.; GOFFAU, M.; HILMI, M.; DAM, B. **A cultura do tomate: produção, processamento e comercialização.** Fundação Agromisa e CTA. 2006.

NAPPER, I. E.; THOMPSON, R. C. **Plastics and the Environment.** Annual Review of Environment and Resources, v. 48, p. 55-79, nov. 2023.

NEGRINI, R. **Quantificação da migração específica de contaminantes metálicos provenientes de utensílios revestidos com politetrafluoretileno em simulante ácido de alimentos.** Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de Caxias do Sul. Rio Grande do Sul. 2021.

OBEBE, S. B.; ADAMU, A. A. **Plastic pollution: causes, effects and preventions.** International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, v. 4, n. 12, p. 85-95, abr. 2020.

PERON, R. M. **Desempenho agrônômico da rúcula (*Eruca sativa* Miller) sob diferentes dosagens de cama de frango.** Dissertação (Mestrado em Agroecologia - Universidade Estadual de Maringá). Maringá, Paraná. 2019.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais.** Maceió: Editora da Universidade Federal de Alagoas, p. 51, 2005.

PIMPINI, F.; ENZO, M. **Present status and prospects for rocket cultivation in the Veneto region.** str. 51-66 u Rocket: A Mediterranean crop for the world (Padulosi S. i. Pignone D., ur.) International Plant Genetic Resources Institute, Rim, Itálijia (Datum pristupa: 10.08.2019), 1997.

QIU, Y.; ZHOU, S.; ZHANG, C.; ZHOU, Y.; QIN, W. **Soil microplastic characteristics and the effects on soil properties and biota: A systematic review and meta-analysis.** Environmental Pollution, v. 313, p. 120183, nov. 2022.

QIANG, L.; HU, H.; LI, G.; XU, J.; CHENG, J.; WANG, J.; ZHANG, R. **Plastic mulching, and occurrence, incorporation, degradation, and impacts of polyethylene microplastics in agroecosystems.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 263, p. 115274, set. 2023.

REIS, J. N. P.; CRUZ, M. P. M.; FILHO, I. O. H.; ASEVEDO, M. D. G.; FREITAS, J. Y. S.; CAJAZEIRAS, J. L. C. **Análise da comercialização do tomate no estado do Ceará nos anos de 2014-2018.** Natural Resources, v. 13, n. 4, p. 81-95, nov. 2023.

RHODES, C. J. **Plastic pollution and potential solutions.** Science Progress, v. 101, n. 3, p. 207-260, 2018.

RICK, C. M. **Tomato.** ACSSESS Publications. 1980.

RILLIG, M. C.; LEHMANN, A.; MACHADO, A. A. S.; YANG, G. **Microplastic effects on plants**. *New Phytologist*, v. 223, n. 3, p. 1066-1070, mar. 2019.

ROCHA, J. R. M. **La importancia del cultivo de tomate**. Monografía (Licenciatura em Ciências Agropecuárias e Biotecnologia - Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”), Torreón, Coahuila, México. Set. 2006.

RONCA, S. **Polyethylene**. *Brydson’s Plastics Materials*, ed. 8., cap. 10, Butterworth-Heinemann, 2017.

ROY, T.; DEY, T. K.; JAMAL, M. **Microplastic/nanoplastic toxicity in plants: an imminent concern**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 1, p. 27, out. 2022.

SAHASA, R. G. K.; DHEVAGI, P.; POORNIMA, R.; RAMYA, A.; MOORTHY, P. S.; ALAGIRISAMY, B.; KARTHIKEYAN, S. **Effect of polyethylene microplastics on seed germination of Blackgram (*Vigna mungo* L.) and Tomato (*Solanum lycopersicum* L.)**. *Environmental Advances*, v. 11, p. 100349, abr. 2023.

SALIM, M. M. R.; RASHID, M. H.; HOSSAIN, M. M.; ZAKARIA, M. **Morphological characterization of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genotypes**. *Journal of Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 19, n. 3, p. 233-240, abr. 2020.

SANTANA, M. J.; VIEIRA, T. A.; BARRETO, A. C.; DA CRUZ, O. C. **Resposta do tomateiro irrigado a níveis de reposição de água no solo**. *Irriga*, v. 15, n. 4, p. 443-454, out. 2010.

SCHLICKMANN, P. H. **A produção de produtos plásticos no Brasil: uma perspectiva histórica e geoeconômica**. *Estudos Geográficos*, v. 23, n. 2, p. 57-76, 2015.

SHI, R.; LIU, W.; LIAN, Y.; WANG, Q.; ZEB, A.; TANG, J. **Phytotoxicity of polystyrene, polyethylene and polypropylene microplastics on tomato (*Lycopersicum esculentum* L.)**. Journal of Environmental Management, v. 317, p. 115441, set. 2022.

SHOROBI, F. M.; VYAVAHARE, G. D.; SEOK, Y. J.; PARK, J. H. **Effect of polypropylene microplastic on seed germination and nutrient uptake of tomato and cherry tomato plants**. Chemosphere, v. 329, p. 138679, jul. 2023.

SOARES, L. A. A.; BRITO, M. E. B.; ARAÚJO, T. T.; SÁ, F. V. S.; DA SILVA, E. C. B. **Morfofisiologia e qualidade pós-colheita do tomateiro sob estresse hídrico nas fases fenológicas**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 8, n. 1, p. 239-246, jan.-mar. 2013.

TIRKEY, A.; UPADHYAY, L. S. B. **Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics**. Marine Pollution Bulletin, v. 170, p. 112604, set. 2021.

ULLAH, R.; TSUI, M. T.; CHEN, H.; CHOW, A.; WILLIAMS, C.; LIGABA-OSENA, A. **Microplastics interaction with terrestrial plants and their impacts on agriculture**. Journal of Environmental Quality, v. 50, n. 5, p. 1024-1041, jul. 2021.

VASILE, C.; PASCU, M. **Practical Guide to Polyethylene**. iSmithers Rapra Publishing, 2005.

VIANA, F. L. E. **Indústria: Indústria de Produtos Plásticos**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil (Caderno Setorial ETENE), v. 8, n. 296, jul. 2023.

VIOL, M. A.; CARVALHO, J. A.; LIMA, E. M. C.; REZENDE, F. C.; MATTOS, R. W. P.; RODRIGUES, J. L. M. **Déficit hídrico e produção do tomate cultivado em ambiente protegido**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 11, n. 1, p. 1244-1253, fev. 2017.

WANG, F.; ZHANG, X.; ZHANG, S.; ZHANG, S.; ADAMS, C. A.; SUN, Y. **Effects of co-contamination of microplastics and Cd on plant growth and Cd accumulation.** Toxics, v. 8, n. 2, p. 36, mai. 2020.

WANG, F.; ZHANG, X.; ZHANG, S.; ZHANG, S.; SUN, Y. **Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil.** Chemosphere, v. 254, p. 126791, set. 2020.

YIN, K.; WANG, Y.; ZHAO, H.; WANG, D.; GUO, M.; MU, M.; LIU, Y.; NIE, X.; LI, B.; LI, J.; XING, M. **A comparative review of microplastics and nanoplastics: toxicity hazards on digestive, reproductive and nervous system.** Science of Total Environment, v. 774, p. 145758, fev. 2021.

ZHANG, Z.; CUI, Q.; CHEN, L.; ZHU, X.; ZHAO, S.; DUAN, C.; ZHANG, X.; SONG, D.; FANG, L. **A critical review of microplastics in the soil-plant system: distribution, uptake, phytotoxicity and prevention.** Journal of Hazardous Materials, v. 424, p. 127750, fev. 2022.