



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
Colegiado do Curso de Ciências Biológicas



**Ciências
Biológicas**
UEL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

JEAN VITOR CORDEIRO JAYME

USO DE MATERIAIS COMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS PARA MITIGAR OS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE PLANTAS - UM ESTUDO COM TOMATE

Londrina – Paraná
2025

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

JEAN VITOR CORDEIRO JAYME

**USO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
BIODEGRADÁVEIS PARA MITIGAR OS EFEITOS DO
DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE PLANTAS - UM
ESTUDO COM TOMATE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina como um dos requisitos à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: André Luiz Martinez de Oliveira
Coorientador: Renata Stolf Moreira

Londrina – Paraná
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

J42 Jayme, Jean Vitor Cordeiro.
Uso de materiais compósitos biodegradáveis para mitigar os efeitos do déficit hídrico em mudas de plantas - Um estudo com tomate / Jean Vitor Cordeiro Jayme. - Londrina, 2025.
60 f.: il.

Orientador: André Luiz Martinez de Oliveira.
Coorientador: Renata Stolf Moreira.
Coorientador: Beatriz Marjorie Marim.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) –
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Biológicas, Graduação
em Ciências Biológicas, 2025.
Inclui bibliografia.

1.Mudanças climáticas - TCC. 2. sustentabilidade - TCC. 3. Bioinsumo - TCC. 4.
biotecnologia - TCC. I. Martinez de Oliveira, André Luiz. II. Stolf Moreira, Renata. III.
Marjorie Marim, Beatriz. IV. Universidade Estadual de Londrina.
Centro de Ciências Biológicas. Graduação em Ciências Biológicas. V. Título.

CDU 574

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Luiz Martinez de Oliveira

Profa. Dra. Renata Stolf Moreira

Dra. Beatriz Marjorie Marim

Profa. Dra. Elisete Pains Rodrigues (suplente)

Londrina, 08 de dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos professores **André Luiz Martinez de Oliveira** e **Renata Stolf Moreira** e as doutorandas **Beatriz Marjorie Marim** e **Nádia Souza Jayme**, pela orientação, pelas contribuições fundamentais e pela dedicação ao longo de todas as etapas deste trabalho. À **Universidade Estadual de Londrina (UEL)**, agradeço pela infraestrutura disponibilizada, pelo ambiente de aprendizado e pelas oportunidades que contribuíram para minha formação. Ao **CNPq**, registro minha gratidão pela concessão da bolsa de iniciação científica, que possibilitou a execução desta pesquisa e o aprofundamento das atividades científicas. Agradeço também aos demais professores, técnicos e colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram com conhecimentos, discussões, suporte técnico e incentivo durante a realização deste trabalho. Por fim, expresso meu sincero agradecimento à minha família e aos amigos, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo contínuo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

RESUMO

JAYME, Jean Vitor Cordeiro. **Uso de materiais compósitos biodegradáveis para mitigar os efeitos do déficit hídrico em mudas de plantas - um estudo com tomate.** 2025. 60 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2025

As mudanças climáticas têm intensificado períodos de seca e a irregularidade das chuvas, comprometendo a ecofisiologia vegetal e dificultando o crescimento, a fotossíntese e a resiliência das plantas. Esses impactos afetam tanto a restauração de áreas degradadas quanto a produtividade agrícola, ressaltando a importância de estratégias que garantam plantas mais saudáveis e sistemas produtivos sustentáveis. Paralelamente, o descarte inadequado de resíduos agroindustriais aumenta os riscos ambientais, reforçando a necessidade de soluções que integrem sustentabilidade e eficiência produtiva. Com base nos princípios de biorrefinaria e economia circular, este estudo avaliou o uso de casca de aveia para produzir compósitos biodegradáveis, denominados espumas biodegradáveis, com potencial para auxiliar o crescimento vegetal sob déficit hídrico. Tomateiros foram cultivados em substratos com ou sem a adição dessas espumas e submetidos a diferentes disponibilidades de água. As plantas cultivadas com as espumas apresentaram maior acúmulo de biomassa, maior área foliar e maiores massas secas da parte aérea e das folhas, indicando contribuição positiva para o crescimento mesmo em condições hídricas limitadas. Embora altura, massa seca e comprimento de raízes também tenham sido superiores nos tratamentos com espumas, as diferenças estatísticas foram discretas. Por outro lado, condutância estomática e índice SPAD foram maiores nas plantas sem espumas, resultados que divergem do esperado e sugerem a necessidade de estudos futuros que investiguem influências microbianas e químicas do substrato. De forma geral, o trabalho demonstra a viabilidade do uso de materiais biodegradáveis derivados de resíduos agrícolas para mitigar efeitos do déficit hídrico, promovendo práticas alinhadas à economia circular e à bioeconomia.

Palavras-chave: Bioinsumo; sustentabilidade; biotecnologia; mudanças climáticas.

ABSTRACT

JAYME, Jean Vitor Cordeiro. **Use of biodegradable composite materials to mitigate the effects of water deficit in plant seedlings - a study with tomatoes.** 2025. 60 pgs. Final Dissertation (Biological Sciences Undergraduation) – Londrina State University. Londrina. 2025.

Climate change has intensified periods of drought and rainfall irregularity, compromising plant ecophysiology and hindering growth, photosynthesis, and resilience. These impacts affect both the restoration of degraded areas and agricultural productivity, highlighting the importance of strategies that ensure healthier plants and sustainable production systems. At the same time, the improper disposal of agro-industrial residues increases environmental risks, reinforcing the need for solutions that integrate sustainability and productive efficiency. Based on the principles of biorefinery and circular economy, this study evaluated the use of oat husk to produce biodegradable composites to as biodegradable foams with the potential to support plant growth under water deficit. Tomato plants were grown in substrates with or without the addition of these foams and subjected to different levels of water availability. Plants cultivated with the foams showed greater biomass accumulation, larger leaf area, and higher shoot and leaf dry mass, indicating a positive contribution to growth even under limited water conditions. Although plant height, root dry mass, and root length were also higher in treatments with the foams, statistical differences were modest. In contrast, stomatal conductance and SPAD index were higher in plants grown without the foams an unexpected result that suggests the need for future studies investigating microbial and chemical influences of the substrate. Overall, the study demonstrates the viability of using biodegradable materials derived from agricultural residues to mitigate the effects of water deficit, promoting practices aligned with circular-economy and bioeconomy principles.

Key-words: Bioinput; sustainability; biotechnology; climate change.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Disposição dos 40 vasos em delineamento casualizado, em casa de vegetação.....35
- Figura 2** – Aspecto visual de plantas de tomate cultivadas em substrato LVe:areia (1:3) sem adição de espumas biodegradáveis a 70% CC (A) e com espuma biodegradável a 70% CC (1%; B e C).....40
- Figura 3** – Aspecto visual de plantas de tomate cultivadas em substrato LVe:areia (1:3) sem adição de espumas biodegradáveis a 50% CC (A) e com espuma biodegradável a 50% CC (1%; B e C).....40
- Figura 4** – Aspecto visual do desenvolvimento da parte aérea e raiz de plantas de tomate, cultivadas em substrato LVe:areia (1:3) referente aos tratamentos T1; T3; T2; e T4.....43

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** – Gráfico de barras das médias referentes ao comprimento da raiz (cm) de plantas de tomate, após 60 dias de cultivo em casa de vegetação e submetidas a diferentes tratamentos (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média.34
- Gráfico 2** – Gráfico de barras comparando os valores médios da altura das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média35
- Gráfico 3** – Gráfico de barras comparando valores médios de massa seca (g) da raiz, de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4).36
- Gráfico 4** – Gráfico de barras comparando valores médios de massa seca da parte aérea (g) de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4).37
- Gráfico 5** – Gráfico de barras comparando os valores médios de área foliar de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média.38
- Gráfico 6** – Gráfico de barras comparando os valores médios de massa seca das folhas das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média39
- Gráfico 7** – Gráfico de barras comparando os valores referentes a razão raiz- parte aérea, obtidos através da divisão da massa seca da raiz pela massa seca da parte aérea das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média42

Gráfico 8 – Gráfico de barras comparando os valores médios do índice de clorofila nas folhas das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas aos quatro tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média	44
Gráfico 9 –Gráfico de barras comparando os valores referentes a condutância estomática observadas nas plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UEL	Universidade Estadual de Londrina
GEE	Gases de Efeito Estufa
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxidos de Nitrogênio
CC	Capacidade de Campo
R/PA	Razão Raiz/Parte Aérea
WRI	World Resources Institute
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMATER- MG	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
CNM	Confederação Nacional de Municípios
LVe	Latossolo Vermelho Eutroférico
SPAD	Soil Plant Analysis Development

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO NA AGRICULTURA E SEGURANÇA ALIMENTAR.....	16
2.2	IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS	18
2.3	IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO NA ECOFISIOLOGIA DAS PLANTAS	21
2.4	RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA BIOTECNOLÓGICA SUSTENTÁVEL PARA O DESENVOLVIMENTO DE BIOINSUMOS.....	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	CONFECÇÃO DAS ESPUMAS	26
3.2	COLETA DO SOLO E PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO.....	26
3.3	MONTAGEM DOS VASOS.....	27
3.4	PLANTIO DAS SEMENTES E DESBASTE	28
3.5	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	28
3.6	ANÁLISES MORFOLÓGICAS E FISIOLÓGICAS.....	31
3.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NO COMPRIMENTO DAS RAÍZES E NA ALTURA DO TOMATEIRO....	33
4.2	INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NO ACÚMULO DE BIOMASSA DAS PLANTAS.....	35
4.3	INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NA PARTIÇÃO DE BIOMASSA ENTRE RAIZ E PARTE AÉREA	40
4.4	INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NO ÍNDICE DE CLOROFILA	43
4.5	INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NA CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA.....	45
5	CONCLUSÃO	48
6	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aquecimento global tem sido amplamente documentado como um fenômeno em constante intensificação. De acordo com relatórios internacionais, entre 2011 e 2020 registrou-se o período mais quente da história desde o início dos registros, com aumento médio de 1,1 °C em relação aos níveis pré-industriais (NOAA, 2021; IPCC, 2021, 2023). No Brasil, as mudanças climáticas têm se manifestado principalmente pela maior variabilidade nos regimes de chuva, o que se traduz em períodos de estiagens prolongadas intercaladas com eventos de precipitação intensa. Essa instabilidade hídrica afeta diretamente a produtividade agrícola e compromete a segurança alimentar em diferentes regiões do país. Estudos recentes têm registrado o aumento da frequência e da intensidade desses fenômenos, confirmando sua influência negativa sobre a agricultura (MCTI, 2024).

Nesse contexto, reconhece-se que as mudanças climáticas exercem impactos diretos sobre a agricultura, tornando essencial a adoção de estratégias de adaptação e mitigação dos efeitos adversos destas mudanças para que o setor produtivo possa enfrentar os desafios desse novo cenário. Nesse sentido, a Embrapa desenvolve um conjunto de mais de 40 projetos multidisciplinares voltados ao estudo das mudanças climáticas (EMBRAPA, 2020).

Uma das manifestações mais evidentes dessas alterações é a irregularidade no regime de chuvas, que tem provocado tanto secas prolongadas quanto precipitações extremas em diferentes regiões (COOK et al., 2018). Esses fenômenos comprometem os ciclos biogeoquímicos do carbono, nitrogênio e fósforo, essenciais para a manutenção da produtividade agrícola e do equilíbrio dos

ecossistemas (AMERAY et al., 2021). A agricultura brasileira, em particular, já contabiliza prejuízos significativos: entre 2013 e 2022, as perdas causadas por eventos climáticos extremos ultrapassaram R\$ 216 bilhões, sendo 86% decorrentes de secas (CNM, 2023).

O estresse hídrico representa um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal, reduzindo a condutância estomática, a condutividade do xilema e a fotossíntese, o que compromete a produção de biomassa e a sobrevivência de mudas em fases iniciais (BRODRIBB et al., 2020). Embora as plantas disponham de mecanismos morfofisiológicos de resposta, sua eficiência é limitada, especialmente em solos degradados, onde a microbiota encontra-se fragilizada (BOUSKILL et al., 2016; DE VRIES et al., 2020). Nessas condições, a mortalidade de mudas em campo é elevada, aumentando os custos de replantio e representando um desafio tanto para a produção agrícola quanto para a restauração ambiental.

Além do impacto climático, outro desafio relevante para a agricultura e o meio ambiente é a elevada geração de resíduos agroindustriais. Grande parte desses resíduos é descartada inadequadamente, potencializando a poluição de solos e corpos d'água. Nesse cenário, a valorização de resíduos surge como alternativa estratégica para reduzir impactos ambientais e gerar insumos sustentáveis (MOREIRA et al., 2018; KLEIN et al., 2019). A casca de aveia, por exemplo, é uma biomassa abundante, de baixo custo e pouco explorada, que pode ser empregada na produção de materiais biodegradáveis com propriedades promissoras para uso agrícola (SILVA et al., 2024)

Materiais obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos apresentam vantagens como leveza, alta capacidade de retenção de água e biodegradabilidade, podendo atuar como suporte para o crescimento vegetal e mitigação de estresses

abióticos (MARCELINO et al., 2016; VERCELHEZE et al., 2019). Estudos recentes demonstram que processos de transformação físico-química e biotransformação de resíduos conferem características benéficas, como a melhoria da qualidade do solo e a redução da dependência de insumos agroquímicos (BRUST, 2024).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso de materiais biodegradáveis produzidos a partir da casca de aveia, como insumos agrícolas. Para isso, serão analisados parâmetros fisiológicos e biométricos de plantas cultivadas sob condições de déficit hídrico. O estudo busca contribuir para o avanço de práticas agrícolas mais sustentáveis, inserindo-se no escopo da bioeconomia, da economia circular e da mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPACTOS DO DÉFICIT HÍDRICO NA AGRICULTURA E SEGURANÇA ALIMENTAR

As mudanças climáticas caracterizam-se por alterações persistentes nos padrões de temperatura, precipitação, umidade e outros fatores ecológicos, resultando em fenômenos climáticos cada vez mais irregulares e imprevisíveis. Esses processos têm sido intensificados principalmente por atividades humanas, entre as quais se destacam a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (N₂O), provenientes da queima de combustíveis fósseis intensificada desde a Revolução Industrial, além do desmatamento, do uso inadequado do solo e da atividade agropecuária intensiva (NUNES, 2023). O acúmulo desses gases na atmosfera aumenta o efeito estufa, intensificando a retenção de calor e alterando o balanço energético do planeta.

Como consequência, observa-se um aumento contínuo das temperaturas médias globais, mudanças nos regimes de precipitação e uma maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e tempestades severas, além da elevação do nível dos oceanos. Essas transformações, contudo, não se distribuem de forma homogênea no espaço: enquanto algumas regiões enfrentam estiagens mais severas, outras registram precipitações excessivas e inundações (YUAN et al., 2024).

Entre os efeitos mais críticos desse novo cenário climático está o estresse hídrico, que ocorre quando a demanda por água excede a disponibilidade proveniente de precipitação ou de reservatórios naturais. Esse fenômeno, intensificado por eventos de seca, tem causado graves impactos em ecossistemas e

sistemas agrícolas (SHAYANMEHR et al., 2022). Estimativas indicam que aproximadamente três quartos das áreas colhidas globalmente, cerca de 454 milhões de hectares foram afetadas por secas entre 1983 e 2009, comprometendo culturas como milho, arroz, soja e trigo e gerando perdas acumuladas estimadas em US\$ 166 bilhões (KIM et al., 2019).

Em cenários regionais, estudos recentes evidenciam a severidade desses impactos: na Europa, por exemplo, a cultura da batata apresentou redução de 16,4% no rendimento durante um evento de seca ocorrido no verão de 2022 na Suíça, agravado pela proibição de irrigação (HEINZ et al., 2025). De modo semelhante, cereais como trigo, cevada e centeio registraram declínios médios de rendimento de cerca de 9% em períodos de seca combinados com ondas de calor, resultando em uma redução de 8% na produção total de cereais europeus em 2018 em relação à média dos cinco anos anteriores (BRÁS et al., 2021).

O déficit hídrico, portanto, não apenas diminui a produtividade agrícola, mas também compromete a estabilidade econômica e social, afetando o rendimento dos agricultores, elevando custos de produção e agravando a insegurança alimentar. Em regiões tropicais e subtropicais, como o Brasil, esses impactos tendem a ser ainda mais intensos, visto que muitos ecossistemas e culturas agrícolas dependem de padrões regulares de precipitação para garantir a germinação, o crescimento e a produção. A alteração desses padrões com chuvas tardias, períodos secos prolongados ou precipitações intensas concentradas aumenta significativamente o risco de estresse hídrico, perda de produtividade e fragilização da agricultura.

No contexto brasileiro, os efeitos do déficit hídrico têm sido recorrentes e profundos, atingindo especialmente as regiões de sequeiro e os

sistemas agrícolas familiares. Levantamento recente da EMATER-MG (2023) apontou que, entre outubro e dezembro de 2023, cerca de 326 mil produtores foram prejudicados pela seca, e que o abastecimento de água nas propriedades foi comprometido em 78,4% dos casos, ocasionando perdas expressivas tanto em lavouras quanto na pecuária. Esses dados evidenciam a vulnerabilidade do setor agropecuário nacional diante das mudanças climáticas e reforçam a necessidade de estratégias de adaptação e manejo sustentável dos recursos hídricos

2.2 IMPACTOS DO DÉFICIT HÍDRICO NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

No contexto brasileiro, as florestas desempenham um papel de magnitude ímpar para a estabilidade ambiental e climática. Entre elas, a Mata Atlântica se destaca como um dos biomas mais biodiversos do planeta e como um dos mais ameaçados. Reconhecida como um *hotspot* de biodiversidade global, ela abriga mais de 20.000 espécies de plantas e mais de 2.000 espécies de animais (SANTANA; MEDEIROS; OLIVEIRA, 2013). Além de sua expressiva diversidade biológica, o bioma presta serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação hídrica e climática, a proteção de encostas, a manutenção da fertilidade dos solos. A Mata Atlântica também exerce papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, atuando como sumidouro de carbono e contribuindo para o sequestro e armazenamento de gases de efeito estufa. Com um potencial de restauração de cerca de 17 milhões de hectares, sua recuperação pode ampliar significativamente a captura de carbono e fortalecer a resiliência ambiental das regiões onde ocorre (SANTANA; MEDEIROS; OLIVEIRA, 2013).

Historicamente, a extensão original da Mata Atlântica ultrapassava 1.400.000 km² apenas em território brasileiro (SILVA; CASTELETTI, 2005). Entretanto,

a intensa ação antrópica ao longo dos séculos resultou em profunda fragmentação e redução drástica de sua cobertura florestal. Levantamentos recentes indicam que restam apenas entre 24% e 28% da cobertura original (CNN BRASIL, 2021; BRASIL, 2022), e que os fragmentos com mais de três hectares e melhor conservados representam cerca de 12% desse total (INPE, 2023).

Nesse contexto, a restauração florestal com espécies nativas torna-se uma estratégia essencial para o restabelecimento das funções ecológicas e para a valorização da biodiversidade em áreas degradadas. Além de promover a recomposição da cobertura vegetal e o retorno de espécies nativas, as florestas exercem papel central na mitigação das mudanças climáticas e na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas. O plantio de árvores nativas e a regeneração natural são amplamente reconhecidos como mecanismos eficazes de sequestro de carbono, contribuindo diretamente para a redução das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (WRI, 2020).

De acordo com o *World Resources Institute* (2020), o crescimento natural de florestas em áreas anteriormente degradadas pode remover até 8,9 bilhões de toneladas de CO₂ por ano até 2050, o que equivale a cerca de 23% das emissões globais anuais. Esse potencial reforça o papel estratégico das florestas como sumidouros de carbono e agentes fundamentais na mitigação do efeito estufa. Em plantações formadas por espécies nativas, as taxas médias de sequestro variam entre 10 e 16,4 tCO₂ ha⁻¹ ano⁻¹, podendo alcançar 18,2 a 29,9 tCO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ em florestas mais maduras (KIMBERLEY; BERGIN; SILVESTER, 2021).

Além do carbono acumulado na biomassa das árvores, o reflorestamento contribui significativamente para o aumento do carbono orgânico no solo. Um estudo conduzido em áreas de restauração da Mata Atlântica demonstrou

que a restauração ativa, baseada no plantio de espécies nativas, promoveu ganhos expressivos tanto no carbono acima do solo quanto no carbono armazenado nas camadas superficiais do solo, refletindo melhorias na qualidade e na saúde do ecossistema (BIELUCZYK et al., 2023).

No entanto, apesar de sua reconhecida importância ecológica e climática, as iniciativas de restauração florestal baseadas no plantio de mudas nativas ainda enfrentam diversas restrições de natureza socioeconômica, que vão desde os altos custos de implementação até a escassez de tecnologias e informações técnicas que subsidiem e aprimorem essas iniciativas (MELO et al., 2013a, 2013b; BRANCALION et al., 2019). No Brasil, o custo médio estimado para o plantio de espécies nativas em projetos de restauração varia entre US\$ 2.000 e US\$ 3.000 por hectare, valor considerado elevado devido à alta taxa de mortalidade das mudas no campo e à consequente necessidade de replantio das mesmas. O estabelecimento das mudas representa a fase mais crítica do processo de restauração, pois é justamente nesse estágio que as plantas estão mais suscetíveis às adversidades climáticas e à baixa disponibilidade hídrica. Espera-se, inclusive, que esses desafios se intensifiquem em razão das mudanças climáticas, comprometendo ainda mais o sucesso e a sustentabilidade dos esforços de restauração florestal (NOLAN et al., 2018). Diante desse cenário, torna-se fundamental investir em tecnologias e práticas de manejo que favoreçam a sobrevivência e o crescimento inicial das plantas, aumentem a retenção de água no solo e aprimorem suas propriedades físico-químicas e biológicas.

2.3 IMPACTOS DO DÉFICIT HÍDRICO NA ECOFISIOLOGIA DAS PLANTAS

As mudanças climáticas têm alterado profundamente os ciclos naturais dos ecossistemas, comprometendo o equilíbrio de elementos essenciais ao desenvolvimento vegetal, como o carbono, o nitrogênio e o fósforo. Essas perturbações reduzem a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes, afetando diretamente o metabolismo, a fisiologia e o crescimento das plantas. Pesquisas apontam que períodos prolongados de seca diminuem a absorção de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, prejudicando a síntese de proteínas, enzimas e outros compostos fundamentais ao desenvolvimento vegetal (HE et al., 2014).

Durante situações de déficit hídrico, as plantas enfrentam severas restrições para manter processos fisiológicos vitais, como a fotossíntese, o transporte de água e o acúmulo de biomassa. A limitação da disponibilidade hídrica induz o fechamento dos estômatos que são pequenas estruturas nas folhas responsáveis pelas trocas gasosas, uma resposta adaptativa que reduz a perda de água por transpiração. No entanto, essa estratégia também limita a entrada de dióxido de carbono (CO_2), comprometendo a assimilação de carbono, a taxa fotossintética e, por consequência, o crescimento e o acúmulo de biomassa, enquanto aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio e seus danos oxidativos nos tecidos (FAROOQ et al., 2024). Em culturas agrícolas como o milho, a exposição à seca tem sido associada à redução significativa da atividade fotossintética, da condutância estomática e do crescimento vegetativo (ZHANG et al., 2018).

Além das limitações estomáticas, o déficit hídrico provoca profundas alterações estruturais no sistema condutor de água das plantas. No xilema, observa-se a redução do diâmetro dos vasos condutores, menor densidade de veias foliares e queda na expressão de genes responsáveis pela produção de aquaporinas. Essas

modificações anatômicas e moleculares reduzem a condutância hidráulica foliar e tornam o transporte de água menos eficiente, aumentando a suscetibilidade à formação de embolias e, conseqüentemente, limitando a capacidade de manutenção da fotossíntese (LI et al., 2025).

Embora a água não participe diretamente da síntese de biomassa, ela desempenha um papel indispensável como agente regulador do metabolismo vegetal. A disponibilidade adequada de água garante o funcionamento eficiente dos processos fisiológicos, favorecendo a abertura estomática, o crescimento dos órgãos e o equilíbrio metabólico da planta. O déficit hídrico reduz o turgor, que atua como força motriz da expansão celular, e afeta indiretamente a divisão e a extensibilidade das células. Essa limitação compromete o crescimento das folhas, reduzindo a interceptação de luz, principalmente durante o estágio vegetativo (TARDIEU, 2013). Assim, a água atua como um elemento essencial à manutenção da fotossíntese e da assimilação de carbono, permitindo que as plantas expressem plenamente seu potencial fisiológico.

De forma geral, o déficit hídrico decorrente das mudanças climáticas compromete desde a nutrição até o metabolismo energético das plantas, afetando negativamente a fotossíntese, o transporte de água e o crescimento. Somados à irregularidade das chuvas e ao aumento das temperaturas, esses efeitos reduzem a produtividade agrícola e a resiliência dos ecossistemas, reforçando a urgência no desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável e de adaptação ao novo cenário climático global.

2.4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS E CASCA DE AVEIA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL

A agricultura moderna enfrenta não apenas os efeitos das mudanças climáticas, mas também o desafio crescente da gestão dos resíduos agroindustriais. A intensificação da produção agrícola, essencial para atender à demanda global por alimentos, gera anualmente milhões de toneladas de subprodutos e resíduos, como cascas, bagaços, palhas e outros materiais orgânicos. Estima-se que a produção global de resíduos de biomassa agrícola e do seu processamento alcance aproximadamente 140 gigatoneladas por ano (TRIPATHI et al., 2019), sendo que os principais países produtores agrícolas, como China, Estados Unidos, Índia e Brasil, respondem juntos por mais de 2,4 gigatoneladas anuais (BENTSEN; FELBY, 2010). Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos podem contribuir para a poluição do solo e da água, acelerar processos de degradação ambiental e comprometer a qualidade dos ecossistemas locais. Por outro lado, a transformação e o aproveitamento desses subprodutos como matéria-prima renováveis representam uma alternativa sustentável e estratégica, permitindo sua reincorporação às cadeias produtivas sob a forma de insumos biotecnológicos de baixo custo.

A magnitude da produção agrícola nacional reforça a dimensão desse desafio. Apenas em 2023, a safra brasileira de grãos ultrapassou 299 milhões de toneladas, representando a maior da série histórica (IBGE, 2023). No Paraná, estado que se destaca como grande produtor, a colheita alcançou cerca de 45 milhões de toneladas no mesmo período (PARANÁ, 2023), evidenciando a abundância de biomassa residual disponível. Quanto maior a produção agrícola, maior também é a geração de resíduos, como palhas, cascas, bagaços e restos de colheita, cujo manejo adequado é essencial para mitigar impactos ambientais da atividade produtiva.

Nesse contexto, a valorização de resíduos agroindustriais configura-

se como uma alternativa estratégica para minimizar impactos ambientais e promover a geração de bioinsumos sustentáveis (MOREIRA et al., 2018; KLEIN et al., 2019). Materiais obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos destacam-se por apresentarem propriedades vantajosas, como baixo peso, elevada capacidade de retenção de água e biodegradabilidade, características que os tornam adequados para atuar como suporte ao crescimento vegetal e na mitigação de estresses abióticos (MARCELINO et al., 2016; VERCELHEZE et al., 2019).

Entre esses resíduos, a casca de aveia se sobressai como uma biomassa residual abundante, de baixo custo e ainda pouco explorada, representando cerca de 25 a 30% do peso do grão. Seu elevado teor de celulose (29,26%), hemicelulose (28,35%) e lignina (22,22%) (WEBSTER, 1996, apud SUEIRO; MALI, 2013) confere-lhe grande potencial para a produção de materiais biodegradáveis com aplicações agrícolas promissoras. No Brasil, a disponibilidade desse resíduo é expressiva, especialmente no estado do Paraná, que se destaca como segundo maior produtor nacional de aveia, alcançando até julho de 2025 uma produção de 248 mil toneladas do cereal, um aumento de 48,9% em relação ao ano anterior (PARANÁ, 2025). Ademais, estudos recentes evidenciam que processos de transformação físico-química e biotransformação desses resíduos podem aprimorar suas propriedades, contribuindo para a melhoria da qualidade do solo e para a redução da dependência de insumos agroquímicos (BRUST, 2024).

A utilização da casca de aveia como base para a produção das espumas biodegradáveis neste trabalho justifica-se por suas propriedades físico-químicas associadas à celulose, principal componente de sua estrutura. A presença de grupos hidroxila (-OH) confere ao material um caráter hidrofílico, permitindo assim a capacidade de rearranjar moléculas de água em seu entorno (GIL-GIRALDO et al.,

2024), podendo favorecer a retenção de água ao redor da matriz fibrosa e reduzindo as perdas de umidade do solo por percolação e evaporação. Dessa forma, quando incorporado ao substrato, o material atua como uma espécie de espuma, elevando a capacidade de retenção hídrica do solo e contribuindo para melhores condições de disponibilidade de água às plantas. Espera-se, assim, que sua aplicação proporcione maior suporte ao desenvolvimento vegetal em situações de déficit hídrico, atenuando os efeitos do estresse e favorecendo a manutenção do crescimento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 PRODUÇÃO DAS ESPUMAS BIODEGRADÁVEIS

Os materiais compósitos chamados de espumas biodegradáveis foram produzidos a partir da mistura manual de diferentes componentes (detalhes protegidos por pedido de proteção intelectual), incluindo casca de aveia (resíduo agroindustrial), amido, fosfato de rocha, glicerol, água destilada e pequenas quantidades de compostos nutrientes e bioativos. A preparação iniciou-se pela adição da água destilada e do glicerol, seguida da incorporação dos componentes sólidos, realizando-se a homogeneização manual por aproximadamente 10 minutos, com movimentos circulares, a fim de garantir uma distribuição uniforme dos constituintes.

Após a homogeneização, a mistura foi submetida ao processo de extrusão a quente, utilizando uma extrusora monorroscas da marca BGM (modelo EL-25, Brasil), operada a 120 °C em quatro zonas de aquecimento, com velocidade de rotação do parafuso de 40 rpm e matriz cilíndrica de 4 mm de diâmetro. O material extrusado, inicialmente em formato de espaguete, foi coletado e fracionado em uma peletizadora, resultando em pellets de espumas cilíndricas com diâmetro e comprimento variando entre 4 e 6 mm.

3.2 COLETA DO SOLO E PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

O solo utilizado neste estudo foi coletado em um fragmento de Mata Atlântica localizado no horto florestal da Universidade Estadual de Londrina, no Estado do Paraná. A área apresenta condições edafoclimáticas típicas da região, e o solo é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (LVe), de ampla ocorrência

no território paranaense. A coleta foi realizada em transectos de 50 m estabelecidos aleatoriamente com profundidade de até 10 cm.

Após a coleta, o solo foi encaminhado ao laboratório, onde passou por secagem natural em ambiente controlado, a fim de reduzir a umidade inicial e facilitar seu manuseio. Em seguida, o solo foi peneirado em malha de 2,0 mm, visando padronizar a granulometria e eliminar resíduos maiores, como raízes e fragmentos de matéria orgânica. Todo o solo foi posteriormente misturado em uma amostra composta para garantir maior homogeneidade em seus aspectos físico-químicos, e biológicos, buscando minimizar possíveis variações entre os diferentes pontos de coleta ao longo dos transectos, assegurando maior uniformidade no substrato utilizado no experimento.

O solo peneirado foi então misturado com areia na proporção de 1:3 (solo:areia, p/p), procedimento adotado para tornar o substrato mais próximo à granulometria de um solo arenoso, com menor retenção de umidade. Por fim, a mistura obtida foi acondicionada em vasos plásticos, sendo adicionado um total de 500g de substrato por vaso (unidade experimental).

3.3 MONTAGEM DOS VASOS

As espumas biodegradáveis utilizadas no ensaio foram incorporadas aos vasos na quantidade de 5 g por unidade experimental, valor definido a partir da proporção estabelecida de 1% em relação à massa total de substrato (1 parte de espumas para 100 partes de substrato). As espumas foram posicionadas cuidadosamente sob o substrato a uma profundidade de 5,5cm da superfície dos vasos, de modo a formar uma camada localizada na região central do vaso, próxima

à zona de maior desenvolvimento do sistema radicular. Para garantir a correta disposição das espumas biodegradáveis, o preenchimento dos vasos foi realizado em duas etapas. Primeiro, foram adicionados 250 g de substrato que serviram como base para a acomodação das espumas paletizadas. Em seguida, sobre essa camada inicial, foi realizada a disposição uniforme da camada de espumas. Por fim, as espumas foram recobertas com mais uma camada de 250 g de substrato, completando a quantidade total estipulada de 500 g por vaso.

3.4 PLANTIO DAS SEMENTES E DESBASTE

As sementes de tomate utilizadas neste experimento são da variedade Santa Clara I-5300, adquiridas da empresa ISLA sementes. Para a instalação do ensaio, foram adicionadas cinco sementes por vaso, sendo posicionadas a uma profundidade de aproximadamente 2 cm. No 15º dia após a semeadura, foi realizado o processo de desbaste com o objetivo de reduzir o excesso de plântulas, mantendo-se apenas duas plantas por vaso. A seleção das plantas foi feita visualmente, escolhendo aquelas que mais haviam desenvolvido a parte aérea.

3.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O conteúdo de umidade do substrato correspondente à capacidade de campo, ou capacidade máxima de absorção de água pelo substrato, foi determinado a partir da pesagem de um vaso contendo substrato seco (P1), seguida pela saturação do substrato com água e nova pesagem (P2). Dessa forma, a diferença entre P2 e P1 (peso do vaso com substrato saturado de água menos o peso do vaso

com substrato seco) definiu a quantidade máxima de água contida nos vasos sob 100% da CC (Capacidade de campo). Este valor foi utilizado para determinar a quantidade de água adicionada aos vasos sob os diferentes tratamentos de disponibilidade hídrica. Durante todo o período experimental, o teor de água nos vasos foi monitorado por gravimetria com auxílio de uma balança digital. Sempre que eram detectadas perdas iguais ou superiores a 5% da quantidade de água previamente estabelecida, procedia-se à sua reposição da quantidade por meio de rega manual.

No total, foram estabelecidos quatro tratamentos distintos, combinando a presença ou ausência das espumas biodegradáveis e a disponibilidade de água no substrato (suficiência hídrica a 70% CC e déficit hídrico moderado a 50% CC). Os tratamentos consistiram em: (T1) vasos com adição das espumas, mantidos a 70% CC; (T2) vasos com adição das espumas mantidos a 50% CC; (T3) vasos sem adição das espumas, mantidos a 70% CC; e (T4) vasos sem adição das espumas, mantido a 50% CC. Para cada um desses tratamentos, foram atribuídas 10 repetições. Ao todo, foram preparados 40 vasos, que permaneceram em casa de vegetação durante todo o período do estudo sub delineamento casualizado.



Figura 1: Disposição dos 40 vasos em delineamento casualizado, em casa de vegetação (Fonte: Nádia Souza Jayme)

O ensaio teve duração total de 60 dias e foi conduzido de acordo com o seguinte planejamento para a imposição do déficit hídrico: inicialmente, todos os vasos foram mantidos durante 15 dias a 70% da capacidade de campo, com este período sendo destinado ao processo de germinação das sementes e estabelecimento das mudas.

Após o estabelecimento inicial das mudanças, os tratamentos que incluíam a condição de déficit hídrico moderado tiveram a irrigação suspensa até que o substrato atingisse 50% CC. A partir desse ponto, todos os vasos foram mantidos de acordo com a condição hídrica pré-estabelecida para cada tratamento (70% ou 50% CC) durante os 45 dias seguintes, até o encerramento do ensaio.

3.6 ANÁLISES MORFOLÓGICAS E FISIOLÓGICAS

Ao término do período experimental, foram realizadas análises morfológicas e fisiológicas das plantas, contemplando características relacionadas tanto ao crescimento quanto ao desenvolvimento.

A análise da área foliar das plantas foi realizada separando cuidadosamente as folhas do caule e colocando-as em um medidor eletrônico de área foliar. Para a determinação da massa seca (g), as plantas foram separadas em: parte aérea (composta por caule e folhas previamente separadas) e sistema radicular (raízes). Após a coleta, essas frações foram envolvidas em envelopes de papel e acondicionadas em estufa de circulação forçada, mantida a 65 °C por um período de 24 horas, assegurando a completa remoção da umidade. Em seguida, as amostras secas foram pesadas em balança analítica, possibilitando a quantificação da biomassa acumulada. A altura das plantas, por sua vez, foi determinada com o auxílio de uma régua milimetrada, com a medida sendo realizada desde a base do caule até o ápice da parte aérea.

A condutância estomática das plantas foi mensurada com o auxílio de um pômetro, O aparelho mede a taxa de troca de vapor d'água e dióxido de carbono através dos estômatos, e para isso, é necessário acoplar uma pequena câmara de pressão à folha, onde são registradas as trocas gasosas. A partir desses registros, o aparelho calcula a taxa de fluxo que ocorre através dos estômatos.

O teor relativo de clorofila das plantas foi avaliado com o auxílio de um clorofilômetro portátil, instrumento que permite mensurar de forma rápida e não destrutiva a concentração desse pigmento nas folhas. O aparelho funciona emitindo feixes de luz sobre as folhas em dois comprimentos de onda distintos, um na faixa do vermelho (cerca de 650 nm) e outro no infravermelho próximo (cerca de 940 nm). A

clorofila presente nas folhas atenua a passagem da luz vermelha, enquanto a luz no infravermelho próximo atravessa a amostra praticamente sem interferência. A diferença entre essas medições é utilizada para gerar um índice relativo de clorofila, que reflete indiretamente a capacidade fotossintética e o estado nutricional da planta, indiretamente sobretudo em relação ao teor de nitrogênio.

3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os vasos foram posicionados em um delineamento totalmente casualizado. Todos os resultados obtidos ao longo do experimento foram submetidos à análise estatística. Foi realizada a análise de variância (ANOVA-1 fator). Quando identificada diferença significativa entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Análises de correlação de Pearson e os respectivos valores de significância (valor P) foram obtidos com auxílio do pacote de programas software estatístico **R** (versão disponível em <http://www.rproject.org>).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NO COMPRIMENTO DAS RAÍZES E NA ALTURA DO TOMATEIRO

Nas plantas referentes ao tratamento T1, foram observados os maiores valores de comprimento da raiz (24,51 cm). Mesmo em condição de déficit hídrico moderado (50% da capacidade de campo), as plantas do tratamento T2, cultivadas em substrato adicionado da espuma, apresentaram valores mais elevados de comprimento da raiz (22,83 cm) em comparação àquelas cultivadas sem as espumas (T3 e T4), apesar da diferença não ser significativa (Gráfico 1)

Os dados obtidos diferem do que foi observado em outros estudos, como é o caso de Ferreira et al. (2023) que ao estudar a cultura do tomate submetida a diferentes níveis de irrigação, constatou que plantas submetidas a menores frequências de rega tendem a apresentar raízes mais longas, como um mecanismo adaptativo para explorar camadas mais profundas do solo em busca de água. Quando as plantas sob déficit hídrico não apresentam maiores comprimentos de raiz, geralmente os tratamentos não apresentam diferença significativa entre si (BRUNNER et al. 2015).

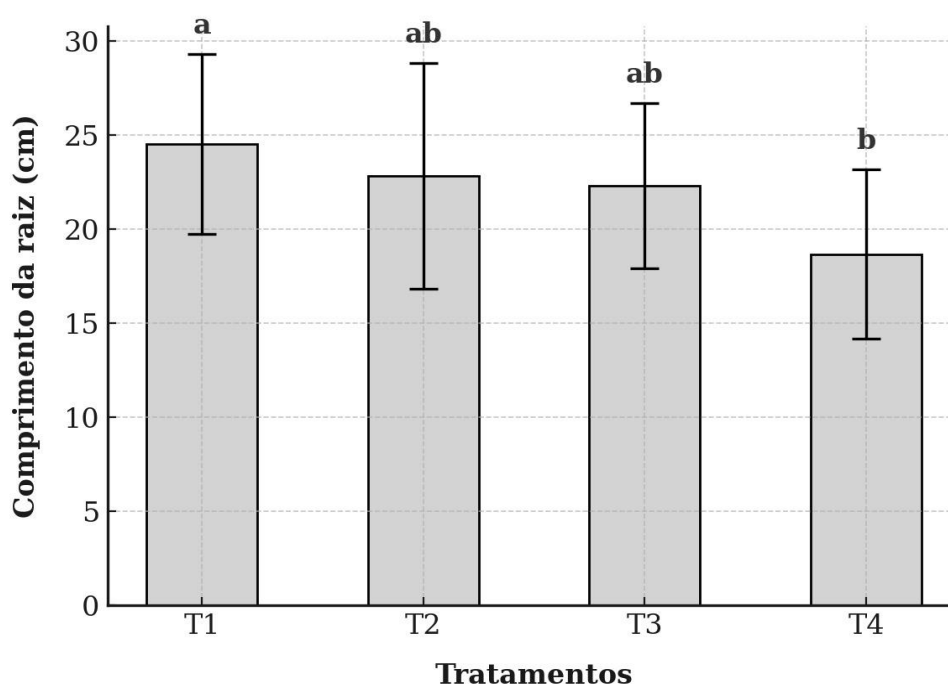


Gráfico 1 – Gráfico de barras das médias referentes ao comprimento da raiz (cm) de plantas de tomate, após 60 dias de cultivo em casa de vegetação e submetidas a diferentes tratamentos ((T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material)). As barras de erro representam o desvio padrão da média (Fonte: O próprio autor).

A análise referente á altura das plantas revelou valores superiores nos tratamentos T1 e T2 (16,34 cm e 16,04 cm, respectivamente) diferenciando significativamente em comparação ao tratamento T3 (11,08 cm), embora a diferença observada em relação ao tratamento T4 (14,67 cm) não tenha sido significativa (Gráfico 2). Resultados semelhantes foram relatados por Morales et al. (2015), que observaram redução na altura de plantas de tomate submetidos a déficit hídrico em sua caracterização do tomateiro submetido a diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo. No entanto, o desempenho do tratamento T4, que superou T3, sendo significativamente maior, mesmo sem a presença das espumas, contraria o comportamento esperado, uma vez que T3 apresentava maior disponibilidade hídrica. Essa inconsistência sugere que outros fatores, como variações no substrato ou na resposta fisiológica das plantas, podem ter influenciado o resultado, reforçando a

necessidade de reavaliação dessa análise em experimentos futuros para confirmar esses padrões de crescimento.

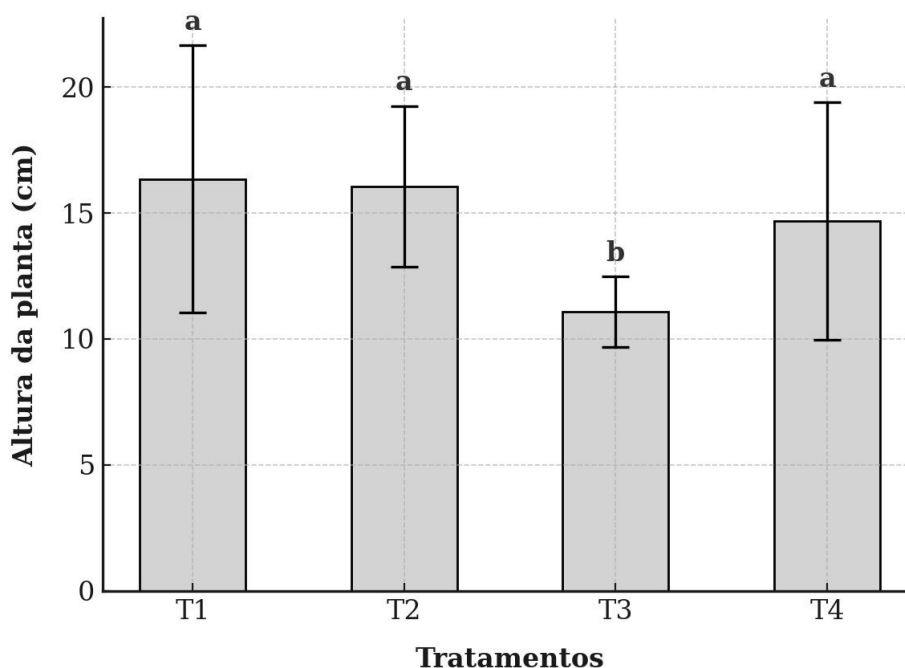


Gráfico 2 – Gráfico de barras comparando os valores médios da altura das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais ((T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material)). As barras de erro representam o desvio padrão da média (Fonte: O próprio autor).

4.2 INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NO ACÚMULO DE BIOMASSA DAS PLANTAS

O tratamento T1 apresentou o maior valor de massa seca da raiz dentre todos os tratamentos, diferindo significativamente do tratamento T3, que obteve o menor acúmulo de massa seca radicular. Os demais tratamentos (T2 e T4) não diferiram estatisticamente entre si e nem de T1 e T3, situando-se em uma faixa intermediária (Gráfico 3). O maior acúmulo de massa seca radicular no tratamento T1, pode ser atribuído ao efeito positivo da espuma em condições de maior disponibilidade de água (70% da capacidade de campo), o que favoreceu a retenção hídrica e a

absorção de nutrientes, potencializada pela presença do ácido húmico, que estimula o crescimento e o aumento da massa seca radicular (DUNOYER et al., 2022; CANGUSSÚ, 2022). Em contrapartida, o tratamento T4, submetido à menor disponibilidade de água e sem o suporte das espumas, apresentou um aumento na biomassa radicular como mecanismo de defesa para explorar maior volume de solo e captar água e nutrientes, comportamento coerente com o relatado por Ferreira et al. (2023) no qual plantas irrigadas a cada dois dias, tiveram maior desenvolvimento radicular do que plantas irrigadas todos os dias. Já o tratamento T3, embora tenha recebido maior disponibilidade de água (70% CC), não apresentou incremento na massa seca radicular, possivelmente por não ter nenhum dos dois estímulos, resultando em um menor crescimento em comparação aos tratamentos cultivados em substratos com as espumas e aos tratamentos sob déficit hídrico moderado.

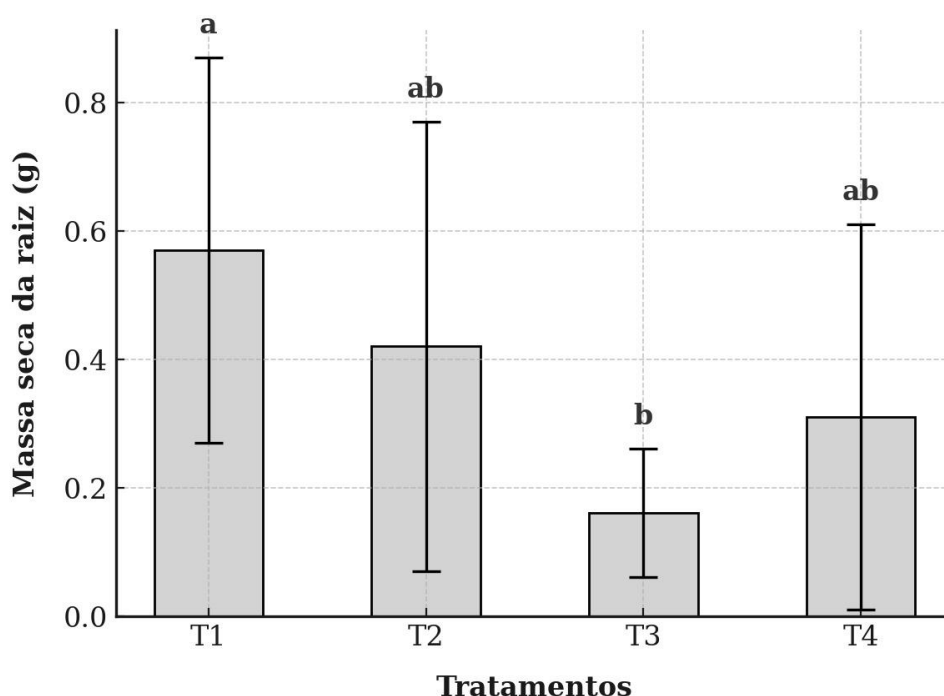


Gráfico 3 – Gráfico de barras comparando valores médios de massa seca (g) da raiz, de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais ((T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material)). (Fonte: O próprio autor).

As plantas cultivadas em substrato com as espumas biodegradáveis (T1 e T2) apresentaram os maiores valores de massa seca da parte aérea, indicando comportamento semelhante sob ambas as condições de umidade (70% e 50% da capacidade de campo). Em contrapartida, os tomateiros referentes aos tratamentos sem espumas (T3 e T4) apresentaram plantas com os menores valores de massa seca da parte aérea, também não diferiram entre si, mas diferiram significativamente de T1 e T2 (Gráfico 4). Esses resultados sugerem que a utilização das espumas favoreceu o crescimento da parte aérea das plantas, mitigando os efeitos do stress hídrico, estando em consonância com o observado em outras culturas submetidas ao déficit hídrico (SHAO *et al.*, 2008).

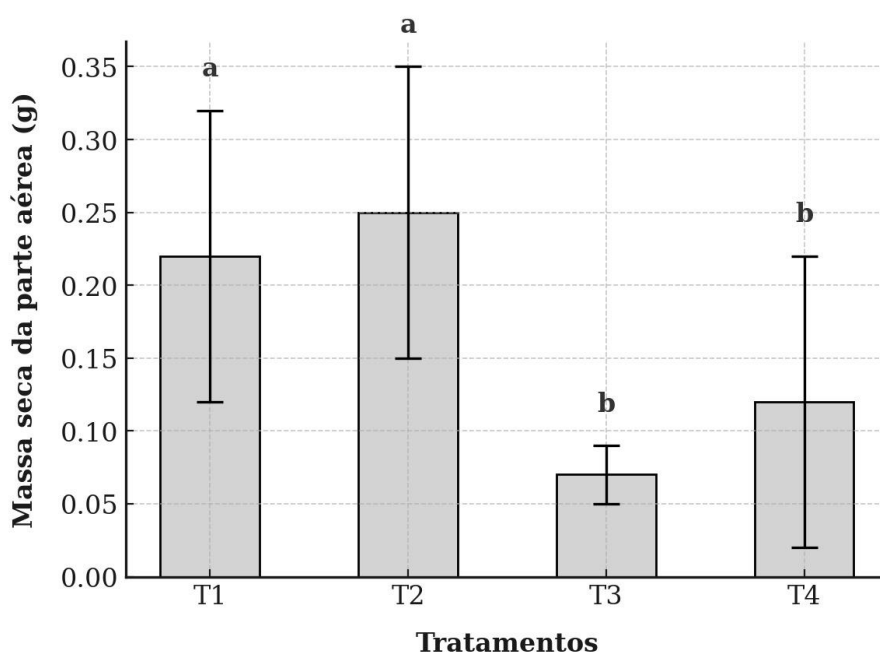


Gráfico 4 – Gráfico de barras comparando valores médios de massa seca da parte aérea (g) de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais ((T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material)). (Fonte: O próprio autor).

Os dados referentes a área foliar também são importantes para o entendimento do maior acúmulo de biomassa dos tratamentos T1 e T2. Os maiores valores da área foliar foram observados nos tratamentos com a adição de espumas

(Gráfico 5). Em comparação com os tomateiros pertencentes a tratamentos sem as espumas, que apresentaram áreas foliares significativamente menores (Gráfico 5), comportamento que geralmente ocorre em plantas sob estresse hídrico, como observado por Arruda *et al.* (2015) ao estudar cultivares de amendoim submetidas ao déficit hídrico. A redução da área foliar se caracteriza como um mecanismo fisiológico de defesa frente à deficiência hídrica, geralmente associada a estratégias que visam diminuir da transpiração e retardar a murcha, com essa adaptação também reduz a interceptação de radiação solar e conseqüentemente, a taxa fotossintética, implicando em menor produção de massa seca (Graciano et al. 2009), como observado, neste trabalho na parte aérea e nas folhas, que também apresentaram valores significativamente maiores nas plantas cultivadas em substrato com as espumas biodegradáveis em relação as cultivadas em substrato sem as espumas (Gráfico 6).

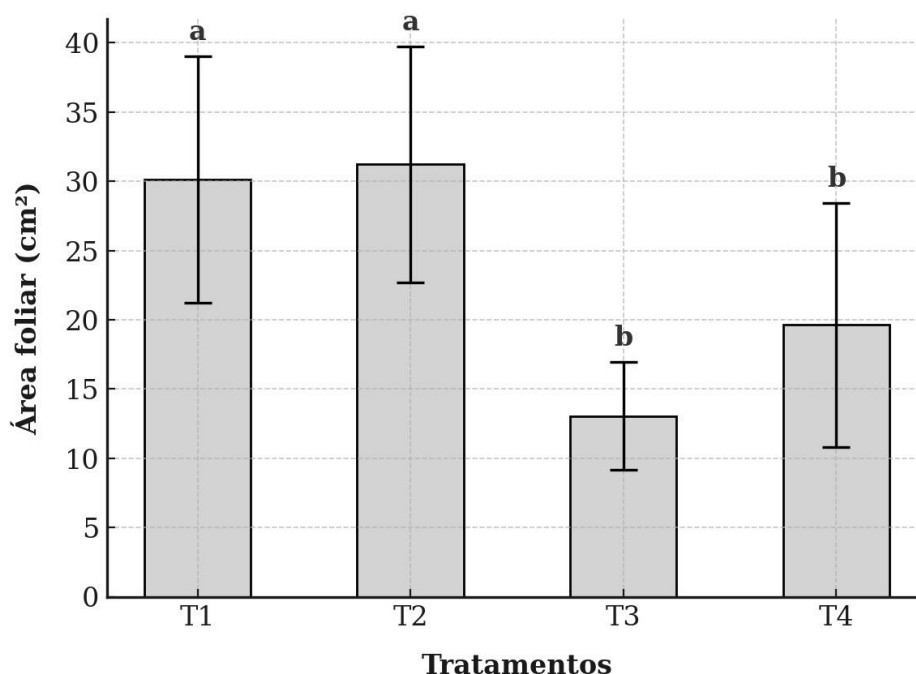


Gráfico 5 – Gráfico de barras comparando os valores médios de área foliar de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material) As barras de erro representam o desvio padrão da média. (Fonte: O próprio autor).

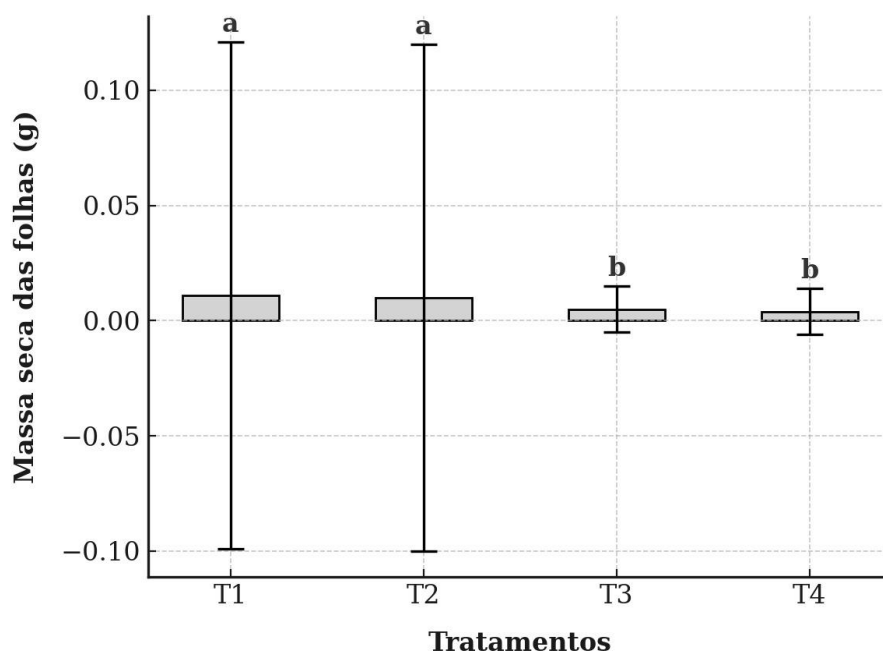


Gráfico 6 – Gráfico de barras comparando os valores médios de massa seca das folhas de plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material). As barras de erro representam o desvio padrão da média. (Fonte: O próprio autor).

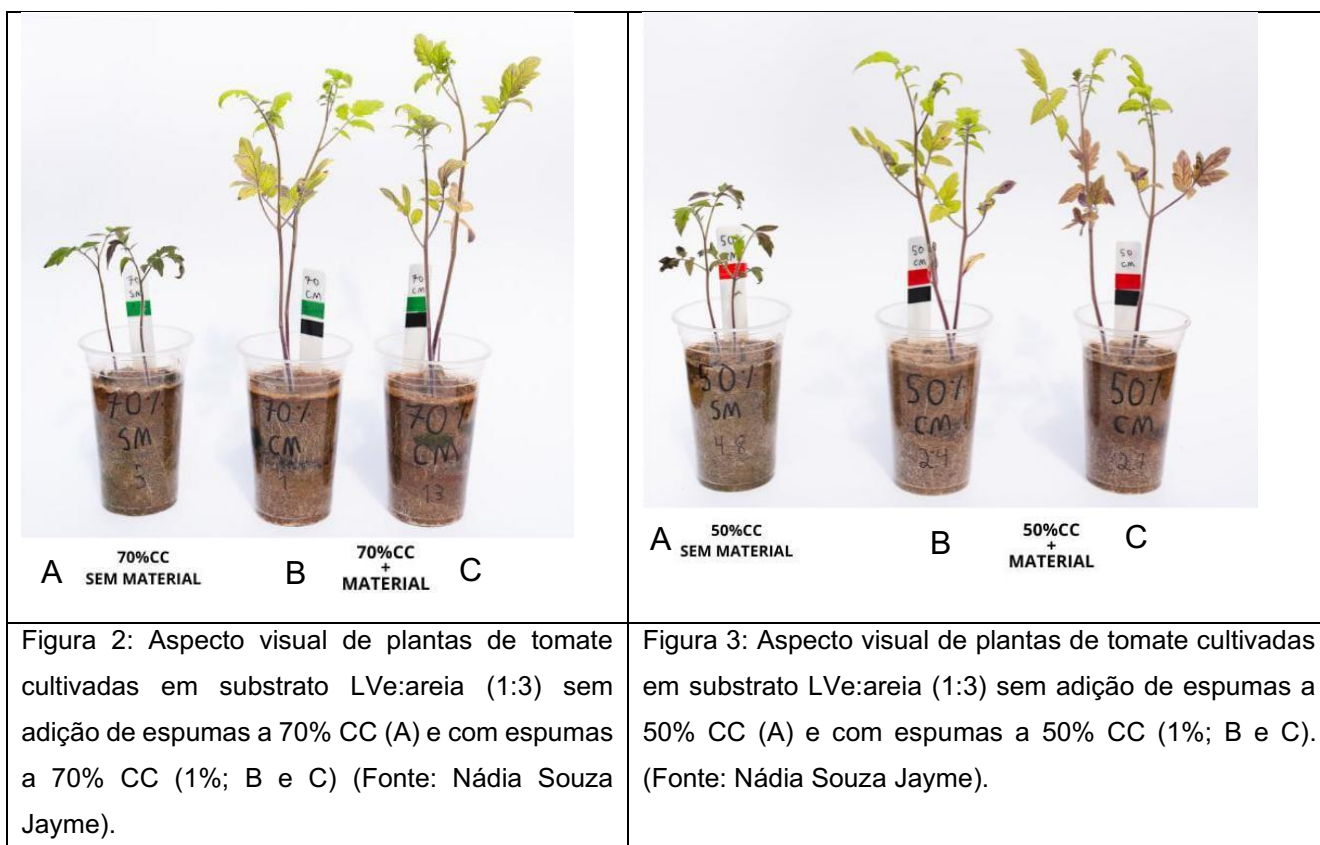


Figura 2: Aspecto visual de plantas de tomate cultivadas em substrato LVe:areia (1:3) sem adição de espumas a 70% CC (A) e com espumas a 70% CC (1%; B e C) (Fonte: Nádia Souza Jayme).



Figura 3: Aspecto visual de plantas de tomate cultivadas em substrato LVe:areia (1:3) sem adição de espumas a 50% CC (A) e com espumas a 50% CC (1%; B e C). (Fonte: Nádia Souza Jayme).

Dessa forma, a utilização das espumas biodegradáveis adicionadas ao substrato demonstrou potencial em estimular o desenvolvimento vegetativo das plantas de tomate, com formação de mudas maiores e com mais biomassa em comparação à mudas cultivadas no substrato sem adição da espuma. Este maior crescimento pode atenuar os efeitos negativos do estresse hídrico, tendo em vista que mudas mais robustas podem absorver maiores quantidades de água e nutrientes, e conseqüentemente promover o acúmulo de mais biomassa. Além disso, as espumas biodegradáveis podem promover a retenção de umidade no substrato resulta em melhor disponibilidade de água para as plantas, e favorecer uma condutância hidráulica mais eficiente e a manutenção do turgor celular. Esses fatores, em conjunto, estimulam a expansão celular e, conseqüentemente, promovem um crescimento vegetativo mais vigoroso (TARDIEU, 2013).

4.3 INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NA PARTIÇÃO DE BIOMASSA ENTRE RAÍZES E PARTE AÉREA

A partição de biomassa, representada pela razão raiz parte aérea (R/PA) tende a aumentar à medida que se intensifica o déficit hídrico, com este comportamento sendo uma estratégia adaptativa das plantas para maximizar a absorção de água e nutrientes do solo. Quando detecta a falta de água no solo, a planta promove um redirecionamento de recursos para o sistema radicular, resultando em maior biomassa de raízes em relação a parte aérea, conseqüentemente, em elevação da R/PA. (REINELT et al., 2023; SHOAIIB et al., 2022), comportamento que não foi registrado de forma significativa nas plantas deste estudo, tendo em vista que nenhum dos tratamentos apresentou diferença significativa em relação aos demais.

No entanto, esse comportamento também foi observado em outros estudos que relatam a ausência de diferença significativa na R/PA de plantas

submetidas diferentes disponibilidades hídricas. Por exemplo, no estudo com mudas de *Erythrina velutina* sob estresse hídrico, Silva et al. (2010) observou que, embora a matéria seca tenha sido reduzida sob déficit hídrico (tal qual também ocorreu neste estudo), a distribuição de biomassa entre raiz e parte aérea não foi alterada. Outro estudo com duas espécies primitivas de trigo relatou que não houve diferença significativa na razão raiz/parte aérea entre grupos expostos a diferentes níveis de irrigação (BATOOL et al., 2019).

No entanto, apesar de não significativo, o fato de ambos os tratamentos sem a presença das espumas biodegradáveis apresentarem respostas tão distintas sugere que outros fatores, além da disponibilidade hídrica, possam ter influenciado o comportamento observado. Diante disso, seria pertinente que essa análise fosse reavaliada em experimentos futuros, incorporando abordagens complementares, como análises microbianas e avaliações físico-químicas do solo, de modo a compreender de forma mais ampla a influência das espumas nos processos que modulam a relação entre raiz e parte aérea sob diferentes condições de estresse hídrico.

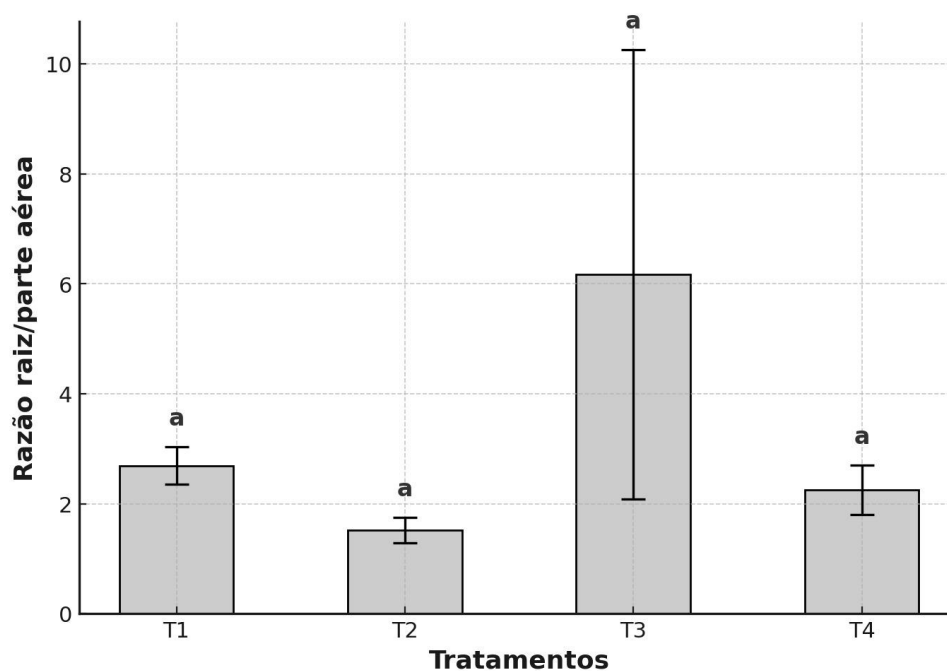


Gráfico 7 - Gráfico de barras comparando os valores referentes a razão raiz-parte aérea, obtidos através da divisão da massa seca da raiz pela massa seca da parte aérea das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos (T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material). As barras de erro representam o desvio padrão da média (Fonte: O próprio autor).



Figura 4 - Aspecto visual do desenvolvimento da parte aérea e raiz de plantas de tomate cultivadas em substrato LVe:areia (1:3) referente aos tratamentos T1; T3; T2 e T4. (Fonte: Nádia Souza Jayme).

4.4 INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NO ÍNDICE DE CLOROFILA

Nas análises referentes ao índice relativo de clorofila, os tratamentos T3 e T4, apesar de apresentarem uma menor área foliar em relação a T1 e T2 (Gráfico 5), exibiram índices de clorofila mais elevados em comparação às plantas cultivadas em substrato com a adição das espumas (Gráfico 8).

Esse comportamento também foi relatado por Moura (2023), que observou aumento nos valores de SPAD em tomateiros submetidos ao déficit hídrico, indicando um possível mecanismo de ajuste fisiológico para otimizar a absorção de luz sob menor área. De forma semelhante, Santos et al. (2013) verificou que gramíneas cultivadas sob diferentes níveis de umidade apresentaram os maiores valores de SPAD nas condições de maior estresse hídrico (25% CC). Resultados análogos também foram observados por Rodrigues et al. (2020), que ao avaliar o comportamento de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob stress hídrico obteve valores de SPAD mais elevados nas plantas com maior restrição hídrica. Aparentemente, esses valores não conferem uma vantagem competitiva para as plantas sob déficit hídrico, tendo em vista seu menor acúmulo de biomassa.

No entanto, os menores valores de SPAD observados nos tratamentos T1 e T2 podem estar relacionados ao nível de disponibilidade de nutrientes no substrato e a demanda das plantas por esses nutrientes. Os tomateiros pertencentes aos tratamentos cultivados em substratos contendo as espumas (T1 e T2), apresentaram maior crescimento e acúmulo de biomassa. Considerando que o substrato utilizado neste estudo apresenta limitações em termos de nutrientes e baixo teor de matéria orgânica por conter 75% de areia em sua composição (BELLOTE; TOMAZELLO FILHO; DEDECEK, 2005), é provável que as plantas dos tratamentos T1 e T2, devido ao maior crescimento e desenvolvimento, tenham passado a

demandar mais nutrientes do que o substrato podia disponibilizar, implicando em menor produção de clorofila em comparação às plantas dos tratamentos T3 e T4, que cresceram menos e, conseqüentemente, apresentaram menor demanda nutricional, podendo continuar investindo em pigmento fotossintetizante. A coloração amarelada presente nas folhas das plantas dos tratamentos T1 e T2 reforçam essa hipótese, tendo em vista que essa característica é causada pela degradação de clorofila para obtenção de nitrogênio quando o mesmo se encontra em falta no substrato (PAULILO; VIANA; RANDI, 2015) o que reduz a quantidade do pigmento nas folhas e leva a menores índices SPAD.

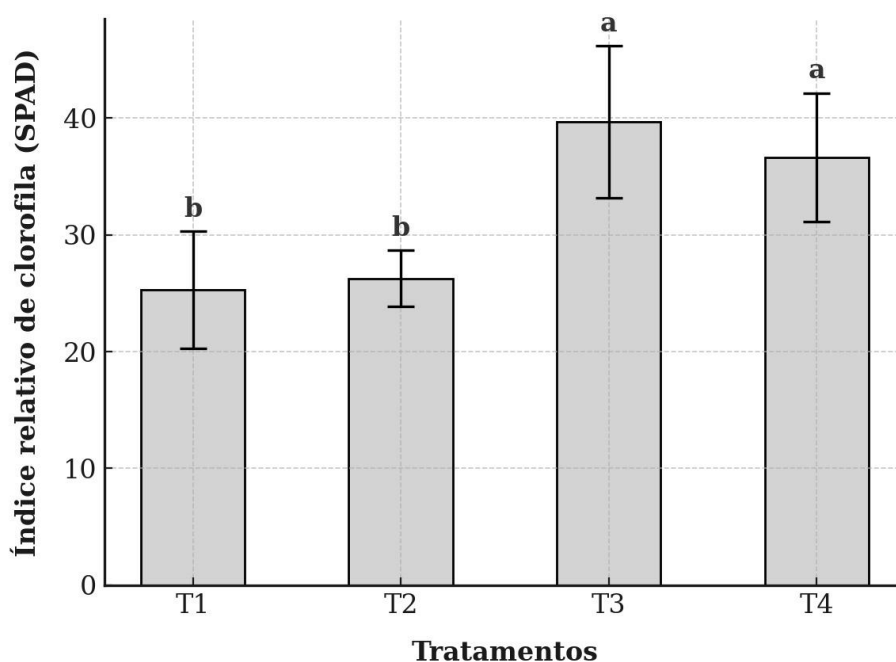


Gráfico 8 – Gráfico de barras comparando os valores médios do índice de clorofila nas folhas das plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas aos quatro tratamentos experimentais (T1 – 70%CC com material; T2 - 50%CC com material, T3 - 70%CC sem material e T4 - 70%CC sem material). As barras de erro representam o desvio padrão da média (Fonte: O próprio autor).

4.5 INFLUÊNCIA DAS ESPUMAS NA CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA

As análises da condutância estomática indicam um comportamento inesperado em relação ao padrão fisiológico sob condições de déficit hídrico. As plantas cultivadas em substrato sem a adição das espumas apresentaram maiores valores de condutância estomática, atingindo $333,03 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no tratamento T4 e $252,22 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no tratamento T3. Em contraste, as plantas cultivadas em substrato com a adição das espumas apresentaram valores significativamente inferiores $195,33$ e $177,41 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para T1 e T2 respectivamente (Gráfico 9).

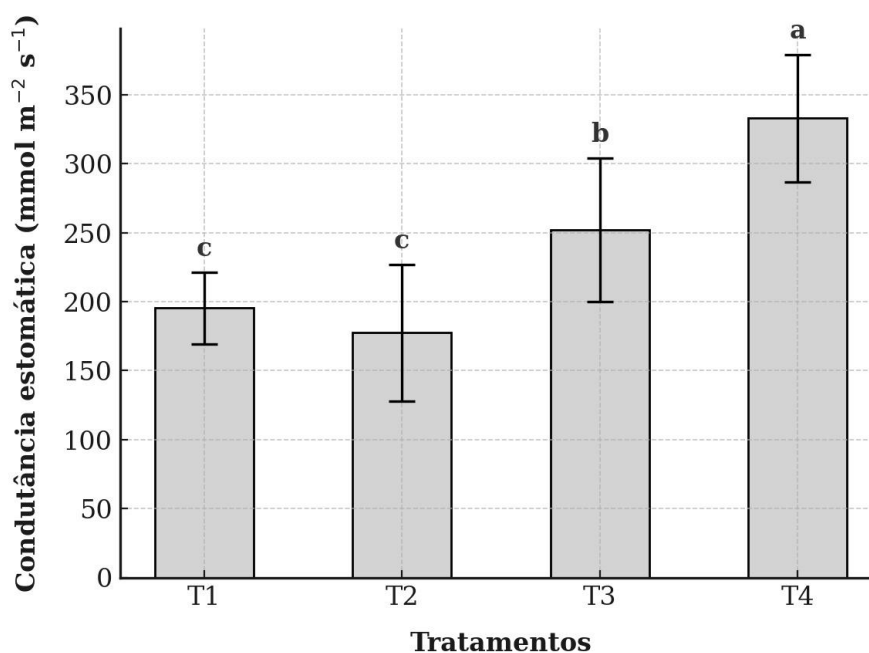


Gráfico 9 – Gráfico de barras comparando os valores referentes a condutância estomática observadas nas plantas de tomate após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, e submetidas a diferentes tratamentos experimentais (T1, T2, T3 e T4). As barras de erro representam o desvio padrão da média

(Fonte: O próprio autor).

Esse resultado contraria as tendências relatadas em outros estudos, que apontam a redução da condutância estomática como resposta típica ao déficit hídrico. Segundo Souza et al. (2005), em estudo com feijoeiro sob diferentes regimes

de irrigação, a diminuição da disponibilidade de água promove o fechamento parcial dos estômatos como uma estratégia de defesa, o que reduz a condutância e a transpiração, minimizando as perdas de água por evaporação foliar. De modo semelhante, Radin et al. (2008), avaliando laranjeira 'Valência' submetidas à restrição hídrica, observou uma queda expressiva na condutância estomática e na taxa de assimilação líquida de CO₂.

Esses estudos reforçam que, em condições de estresse hídrico, a condutância estomática tende a diminuir como forma de conservação da água e manutenção do potencial hídrico foliar. Portanto, o aumento observado nas plantas cultivadas em substrato sem a adição das espumas, que supostamente estariam sob maior estresse, representa uma resposta fisiológica atípica.

Uma possível explicação fisiológica para esse comportamento pode estar associada à tentativa das plantas de regular a temperatura foliar por meio da transpiração. Segundo Marchin et al. (2022), em estudo com espécies arbóreas expostas a ondas de calor, a abertura dos estômatos e consequentemente o aumento da condutância estomática sob condições de calor extremo pode ocorrer como estratégia para resfriamento evaporativo das folhas, evitando danos térmicos nos tecidos fotossintéticos. No entanto, no atual estudo as medições com o porômetro foram conduzidas em dias sem registro de altas temperaturas, o que enfraquece a influência direta do estresse térmico como fator responsável pela elevação da condutância estomática. Embora a abertura estomática possa ser um mecanismo compensatório em algumas situações, a ausência de calor excessivo no dia da análise sugere que outros fatores como possam ter influenciado a resposta observada.

Outra hipótese plausível é uma possível limitação instrumental durante as medições de condutância estomática. O estudo de Rodeghiero et al. (2007)

demonstrou que câmaras de medição do tipo *clamp-on* podem apresentar vazamentos difusivos de vapor d'água e CO₂, resultando em superestimação dos valores de trocas gasosas, especialmente quando a superfície foliar não se ajusta perfeitamente à abertura do sensor. No referido trabalho, foram inclusive realizadas medições em folhas mortas, nas quais foram detectadas condutâncias artificiais atribuídas exclusivamente a vazamentos de difusão.

Neste estudo, as plantas dos tratamentos T3 e T4 apresentaram folhas menores (Gráfico 5) e com aspecto mais enrugado de superfície irregular (Figura 2 e 3), o que pode ter prejudicado ligeiramente o contato entre a lâmina foliar e o clipe do porômetro SC-1. Essa condição poderia favorecer pequenas trocas de ar na região de vedação, levando à superestimação dos valores de condutância, ainda mais levando em conta que os valores aumentam de forma diretamente proporcional ao aumento do DH, de tal forma que T3 e T4 diferem significativamente não somente de T1 e T2, mas também entre si. Entretanto, é importante destacar que, mesmo sendo *clamp-on* o princípio de funcionamento do porômetro SC-1 utilizado no experimento não é idêntico ao sistema utilizado por Rodeghiero et al. (2007), de modo que as condições experimentais não são diretamente comparáveis. Dessa forma, recomenda-se que esta análise seja repetida em experimentos futuros para que se possa obter mais dados sobre a condutância estomática e avaliar se este padrão se repete.

5 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a adição da espuma biodegradável ao substrato de cultivo de mudas de tomate melhorou o crescimento e a qualidade fisiológica das plantas, mesmo aquelas submetidas a déficit hídrico. As plantas cultivadas em substratos com as espumas apresentaram maior acúmulo de biomassa total, maior área foliar, maior massa seca da raiz, da parte aérea e das folhas, indicando que o produto contribuiu para a manutenção do desempenho vegetal, mesmo sob condições de déficit hídrico. As análises referentes a Altura das plantas, comprimento da raiz e potencial de água das folhas apesar de terem sido maiores nas plantas cultivadas em substrato com a adição das espumas, tiveram uma pequena diferença estatística.

As análises referentes condutância estomática e o índice de clorofila (SPAD), apresentaram comportamentos distintos do esperado, sendo maiores nas plantas cultivadas sem as espumas, reforçando a necessidade de aprofundamento em análises futuras que considerem também aspectos microbianos e químicos do solo, a fim de elucidar os mecanismos responsáveis por essas respostas atípicas. De modo geral, o estudo corrobora a viabilidade do uso de materiais compósitos biodegradáveis oriundos de resíduos agrícolas como insumo complementar para mitigar os efeitos do déficit hídrico.

6 REFERÊNCIAS

1. AMERAY, A., BERGERON, Y., VALERIA, O.; GIRONA, M. M.; CAVARD, X. Forest carbon management: a review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate and tropical forests. *Current Forestry Report*, v. 7, p. 245–266, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
2. ARRUDA, Isabella Mendonça; MODA-CIRINO, Vânia; BURATTO, Juliana Sawada; FERREIRA, Josué Maldonado. *Crescimento e produtividade de cultivares e linhagens de amendoim submetidas a déficit hídrico. Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 146-154, abr./jun. 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529652>
3. BATOOL, A.; CHENG, Z.-G.; AKRAM, N. A.; LV, G.-C.; XIONG, J.-L.; ZHU, Y.; ASHRAF, M.; XIONG, Y.-C. *Partial and full root-zone drought stresses account for differentiate root-sourced signal and yield formation in primitive wheat*. *Plant Methods*, v. 15, art. n. 75, 12 jul. 2019. doi: 10.1186/s13007-019-0461-5.
4. BELLOTE, Antonio Francisco Jurado; TOMAZELLO FILHO, Mario; DEDECEK, Renato Antonio. *Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de Pinus taeda*. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 94 p. (Documentos, 121).
5. BIELUCZYK, W.; ASSELTA, F. O.; NAVROSKI, D.; GONTIJO, J. B.; VENTURINI, A. M.; MENDES, L. W.; SIMON, C. P.; CAMARGO, P. B. de; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; BENDASSOLLI, J. A.; RODRIGUES, R. R.; PUTTEN, W. H. van der; TSAI, S. M. **Relacionando o sequestro de carbono acima e abaixo do solo, as propriedades da matéria orgânica do solo e a saúde do solo na restauração da Mata Atlântica brasileira**. *Journal of Environmental*

- Management*, v. 344, art. 118573, 15 out. 2023.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118573>
6. BOUSKILL, N. J.; WOOD, T. A.; BARAN, R.; YE, Z.; BOWEN, B. P.; LIM, H. C.; ZHOU, J.; NOSTRAND, J. D. V.; NICO, P.; NORTHEN, T. R.; SILVER, W. L.; BRODIE, E. L. Belowground Response to Drought in a Tropical Forest Soil. I. Changes in Microbial Functional Potential and Metabolism. *Frontiers in Microbiology*, v. 7, p. 525, 2016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00525>
 7. BRANCALION, P.; MELI, P.; TYMUS, J.; LENTI, F.; BENINI, R.; SILVIA, P.; ISERNHAGEN, I.; HOLL, K. What makes ecosystem restoration expensive? A systematic cost assessment of projects in Brazil. *Biological Conservation*, v. 240, p. 108247, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108274>.
 8. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Relatório de Mudança do Clima no Brasil. Brasília, DF: MCTI, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Clima_Brasil.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.
 9. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *Mata Atlântica*. Portal “Biodiversidade e Biomas”. Publicado em 28 jan. 2022; atualizado em 05 set. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/mata-atlantica>. Acesso em: 23 de outubro de 2025
 10. BRÁS, T. A.; SEIXAS, J.; CARVALHAIS, N.; JÄGERMEYR, J. Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 6, Art. 065012, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf004>
 11. BRODRIBB, T.; COCHARD, H.; CHOAT, B. Hanging by a thread? Forests and

- drought. *Science*, v. 368, p. 261-266, 2020.
<https://doi.org/10.1126/science.aat7631.4>.
12. BRUNNER, I.; HERZOG, C.; DAWES, M. A.; AREND, M.; SPERISEN, C. How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, v. 6, art. n. 547, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547>
13. BRUST, P. A. S. Avaliação de um micomaterial compósito como agente de retenção de água em solo submetido a estresse hídrico. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Biotecnologia), Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias. Londrina, 2024, 54 p.
14. CANGUSSÚ, Luanna Vanessa de Souza. *Ácidos húmicos e Serendipita indica: efeitos sobre o crescimento, nutrição, fisiologia e produção do feijoeiro*. 2022. 80 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2022.
15. CNN Brasil. *Apenas 25,8% da Mata Atlântica está preservada, aponta estudo*. CNN Brasil, 15 set. 2021. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/apenas-258-da-mata-atlantica-esta-preservada-aponta-estudo/#google_vignette. Acesso em: 23 de outubro de 2025
16. CNM – Confederação Nacional de Municípios. Prejuízo da agropecuária nos últimos 10 anos. Estudo Técnico, 2023, 13 pp. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/biblioteca/download/15732>.
17. COOK, B. I.; MANKIN, J. S.; MARVEL, K.; WILLIAMS, A. P.; SMERDON, J. E.; ANCHUKAITIS, K. J. Twenty-First-Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios. *Earths Future*, v. 8, e2019EF001461, 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017EF000659>
18. DE VRIES, F. T.; GRIFFITHS, R. I.; KNIGHT, C. G.; NICOLITCH, O.; WILLIAMS,

- A. Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Science*, v. 368, p. 270-274, 2020. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>.
19. DUNOYER, Arnulfo A. T.; COLPAS, Fredy; MERCADO, Jairo E. Effect of humic acid on the growth of seedling tomato (*Solanum lycopersicum*) and melon (*Cucumis melo*). *Ambiente & Água*, v. 17, n. 4, p. 1-11, 2022. doi: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2808>
20. EMBRAPA. Portfólio de mudanças climáticas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133597/1/FD-Portfolio-Mudancas-Climaticas-2020.pdf> Acesso em: 20 set. 2025
21. FAROOQ, M.; WAHID, A.; ZAHRA, N.; HAFEEZ, M. B.; SIDDIQUE, K. H. M. *Recent advances in plant drought tolerance*. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 43, p. 3337-3369, 2024. DOI 10.1007/s00344-024-11351-6.
22. FERREIRA, Heitor Vinicius Barcelos; MEDEIRA, Igor Felipe; SCHIEBELBEIN, Luis Miguel. *Desenvolvimento da cultura do tomate (*Solanum lycopersum* L.) com diferentes níveis de irrigação*. *Revista Scientia Rural*, v. 27, n. 1, p. 23–35, 2023. Disponível em: <https://www.phantomstudio.com.br/index.php/ScientiaRural/article/view/2612/pdf> Acesso em: 09 de novembro de 2025.
23. FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2021-2022 – relatório técnico*. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2023.
24. GEORGE, S.; JATOI, S. A.; SIDDIQUI, S. U. Genotypic differences against PEG simulated drought stress in tomato. *Pakistan Journal of Botany*, v. 45, n. 5, p. 1551-1556, 2013. Disponível em: [http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/45\(5\)/03.pdf](http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/45(5)/03.pdf). Acesso em: 31 ago. 2025.

25. GIL-GIRALDO, Gina A.; MANTOVAN, Janaina; MARIM, Beatriz M.; KISHIMA, João O. F.; BELUCI, Natália C. L.; MALI, Suzana. *Ultrasound-Assisted Process to Increase the Hydrophobicity of Cellulose from Oat Hulls by Surface Modification with Vegetable Oils*. *Polysaccharides*, v. 5, n. 3, p. 463-477, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides5030029>
26. GRACIANO, E. S. A. **Estudos fisiológicos e bioquímicos de cultivares de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetidas à deficiência hídrica**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.
27. HEINZ, M.; TUREK, M. E.; SCHAEFLI, B.; KEISER, A.; HOLZKÄMPER, A. Can adaptations of crop and soil management prevent yield losses during water scarcity? A modeling study. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 29, p. 1807-1827, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-29-1807-2025>
28. HE, Mingzhu; DIJKSTRA, Feike A. *Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis*. *New Phytologist*, v. 204, n. 4, p. 924-931, 2014. doi: [10.1111/nph.12952](https://doi.org/10.1111/nph.12952)
29. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Em março, IBGE prevê safra de 299,7 milhões de toneladas para 2023*. Agência de Notícias, 13 abr. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/36667-em-marco-ibge-preve-safra-de-299-7-milhoes-de-toneladas-para-2023>. Acesso em: 21 set. 2025.
30. IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report: Climate change and land. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
31. IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). (2021). Summary

- for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
32. KIMBERLEY, Mark; BERGIN, David; SILVESTER, Warwick. *Carbon Sequestration by Native Forest – Setting the Record Straight.*: Tāne’s Tree Trust; Pure Advantage, 2021. Disponível em: <https://climateandnature.org.nz/wp-content/uploads/2022/09/1Carbon-Sequestration-by-Native-Forest%E2%80%93Setting-the-Record-Straight.pdf>. Acesso em: 22 de outubro de 2025.
33. KLEIN, C. B.; CHAGAS, F. M.; WATANABE, B. D. M.; BONOMI, A.; FILHO, M. R. Low carbon biofuels and the new brazilian national biofuel policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane microalgae biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 115, 109365, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109365>
34. LI, Xiuli; WANG, Shuo; ZHU, Lingxiao; ZHANG, Peng; QI, Hong; ZHANG, Ke; SUN, Hongchun; ZHANG, Yongjiang; LEI, Xiaopeng; LI, Anchang; WANG, Zhanbiao; LI, Cundong; LIU, Liantao. *Leaf hydraulic decline coordinates stomatal and photosynthetic limitations through anatomical adjustments under drought stress in cotton.* *Frontiers in Plant Science*, v. 16, 2025. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1622308>
35. MAGALHÃES FILHO, J. R.; AMARAL, L. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C. *Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira ‘Valência’ sobre dois tipos de porta-enxerto.* *Bragantia*, v. 67, p. 75-82, 2008. doi: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000100009>

36. MARCHIN, Renée M.; BACKES, Diana; OSSOLA, Alessandro; LEISHMAN, Michelle R.; TJOELKER, Mark G.; ELLSWORTH, David S. *Extreme heat increases stomatal conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species*. *Global Change Biology*, v. 28, n. 3, p. 1133-1146, 2022. doi: 10.1111/gcb.15976
37. MARGULIS, Sérgio; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt. *Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades*. São Paulo: IBEP Gráfica; Instituto Internacional para Sustentabilidade – IIS Rio, 2010. Disponível em: https://www.iis-rio.org/wp-content/uploads/2019/10/Economia_do_clima.pdf. Acesso em: 20 de outubro de 2025.
38. MELO, F.; ARROYO-RODRIGUEZ, V.; FAHRING, L.; MARTINEZ-RAMOS, M.; TABARELLI, M. On the hope for biodiversity-friendly tropical landscapes. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 28, p. 462-468, 2013a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2013.01.001>.
39. MELO, F.; PINTO, S.; BRANCALION, P.; CASTRO, P.; RODRIGUES, R.; ARONSON, J.; TABARELLI, M. Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: Early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. *Environmental Science and Policy*, v. 33, p. 395-404, 2013b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.07.013>.
40. MORALES, R. G. F.; RESENDE, L. V.; BORDINI, I. C.; GALVÃO, A. G.; REZENDE, F. C. *Caracterização do tomateiro submetido ao déficit hídrico*. *Scientia Agraria*, v. 16, p. 9-17, 2015. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99538306001>. Acesso em: 16 de outubro de 2025
41. MOREIRA, A.A.; MALI, S.; YAMASHITA, F.; BILCK, A.P.; DE PAULA, M.T.;

- MERCI, A.; OLIVEIRA, A.L.M. Biodegradable plastic designed to improve the soil quality and microbiological activity. *Polymer Degradation and Stability*, v. 158, p. 52-63, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2018.10.023>
42. MOURA, M. M. **Avaliação da temperatura da parte aérea através da termografia na cultura do tomate cereja sob diferentes estratégias de irrigação deficitária.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
43. NOLAN, C.; OVERPECK, J. T.; ALLEN, J. R.; ANDERSON, P. M.; BETANCOURT, J. L.; BINNEY, H. A.; BREWER, S.; JACKSON, S. T. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science*, v. 361, p. 920-923, 2018. <https://doi.org/10.1126/science.aan5360>.
44. NUNES, L. J. R. The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. *Environments*, v. 10, n. 4, Art. 66, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/environments10040066>.
45. OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D. *Stomatal conductance as an indicator of water stress in bean.* *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 1, p. 86-95, 2005. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100010>
46. PARANÁ – Agência de Notícias. *Paraná lidera crescimento da safra de grãos, com alta de 447 mil toneladas, aponta IBGE.* Curitiba: Agência de Notícias do Estado do Paraná, 10 jul. 2025. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Parana-lidera-crescimento-da-safra-de-graos-com-alta-de-447-mil-toneladas-aponta-IBGE> Acesso em: 10 de outubro de 2025
47. PARANÁ. *Paraná lidera crescimento da safra de grãos com alta de 447 mil toneladas, aponta IBGE.* Agência Estadual de Notícias, Curitiba, 10 jul. 2025.

Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Parana-lidera-crescimento-da-safra-de-graos-com-alta-de-447-mil-toneladas-aponta-IBGE>

Acesso em: 21 set. 2025.

48. PAULILO, Maria Terezinha Silveira; VIANA, Ana Maria; RANDI, Áurea Maria. *Fisiologia vegetal*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. 182 p.
49. REINELT, L.; WHITAKER, J.; KAZAKOU, E.; BONNAL, L.; BASTIANELLI, D.; BULLOCK, J. M.; OSTLE, N. J. *Drought effects on root and shoot traits and their decomposability*. *Functional Ecology*, v. 37, n. 4, p. 1044-1054, 2023. doi: 10.1111/1365-2435.14261.
50. RODEGHIERO, R. P.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 2, p. 165-174, 2007. DOI: 10.1590/S1415-43662007000200008
51. RODRIGUES, Natália Fernandes; CARVALHO, Germana de Oliveira; TAVARES, Silvio Roberto de Lucena; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; CLEMENTE, Eliane de Paula. *Uso do SPAD para monitoramento da atividade fotossintética de Brachiaria brizantha cv. Marandu submetida a estresse hídrico*. Niterói: Universidade Federal Fluminense; Embrapa Solos, 2021.
52. RODRIGUES, N.; CARVALHO, G. D. O.; TAVARES, S. D. L.; DONAGEMMA, G.; CLEMENTE, E. D. P. Índice SPAD para monitoramento da atividade fotossintética da braquiária submetida ao estresse hídrico. *Ciências agrárias, indicadores e sistemas de produção sustentáveis 2*. Ponta Grossa: Atena, 2021. cap. 7, p. 80-86.
53. SANTANA, Átila Cristian; MEDEIROS, João de Deus; OLIVEIRA, Emerson Antônio de. *Lições aprendidas na conservação e recuperação da Mata Atlântica:*

- adequação ambiental de propriedades rurais a partir da experiência da Associação dos Municípios do Alto Vale do Itajaí*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2013. (Série Biodiversidade, 47).
54. SANTOS, Cláudia Cardoso dos; BONFIM-SILVA, Edna Maria; SILVA, Tonny José Araújo da; SANTOS, Tânia de Fátima Silveira dos; MATOS, Débora Santana de. *Gramíneas tropicais submetidas a estresse hídrico*. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1563-1570, 2013.
55. SHAO, Hong-Bo; CHU, Li-Ye; JALEEL, Cheruth A.; ZHAO, Chang-Xing. *Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants*. *Comptes Rendus Biologies*, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.01.002>
56. SHOAI, M.; BANERJEE, B. P.; HAYDEN, M.; KANT, S. *Roots' Drought Adaptive Traits in Crop Improvement*. *Plants*, v. 11, n. 17, art. n. 2256, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/plants11172256>
57. SILVA, Daniela Andreska da; SOUZA, Maria Vanessa Pires de; VIDAL, Karine Silva Pimentel; ALVES, Francisco Gleyson da Silveira; CÂNDIDO, Magno José Duarte; SILVA, Alexsandro Oliveira da. Resposta morfofisiológica do tomate cereja sob distintas estratégias de irrigação e aplicação de hidrogel. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 8.; CONIRD, 32., 2023, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2023
58. SILVA, E. C.; ARAÚJO, M. F.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B. de. Growth evaluation and water relations of *Erythrina velutina* seedlings in response to drought stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 22, n. 4, p. 225-233, 2010. doi: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000400002>
59. SILVA, José Maria Cardoso da; CASTELETTI, Carlos Henrique M. *Estado da*

- biodiversidade da Mata Atlântica brasileira*. In: GALINDO-LEAL, Carlos; CÂMARA, Ibsen de Gusmão. *Mata Atlântica: biodiversidade, ameaças e perspectivas*. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica; Belo Horizonte: Conservação Internacional, 2005. p. 43–59.
60. SILVA, S. C.; CARVALHO, F. A.; YAMASHITA, F. Potential biodegradable materials containing oat hulls, TPS, and PBS by thermoplastic injection. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 34, n. 3, e20240026, 2024. DOI: 10.1590/0104-1428.20240019.
61. SUEIRO, A. C.; MALI, S. Propriedades físico-químicas e funcionais da casca de aveia “in natura” e branqueada. *Anais do III Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia – BBR: Biochemistry and Biotechnology Reports*, Londrina, v. 2, n. 3, p. 253–256, 2013.
62. TARDIEU, François. *Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit*. *Frontiers in Physiology*, v. 4, 2013. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00017>
63. TURAN, Metin; EKINCI, Melek; ARGIN, Sanem; BRINZA, Mihail; YILDIRIM, Ertan. Melhoria do estresse hídrico em mudas de tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) por bioestimulante como agente regenerativo. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1211210, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211210>
64. VERCELHEZE, Ana Elisa S.; MARIM, Beatriz Marjorie; OLIVEIRA, André Luiz Martinez; MALI, Suzana. Desenvolvimento de revestimentos biodegradáveis para sementes de milho e sua aplicação na imobilização de *Azospirillum brasilense*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 103, n. 5, p. 1-12, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09646-w>
65. WRI Brasil. *Regeneração natural de florestas captura carbono mais rápido do que*

se pensava. 05 out. 2020. Disponível em:

<https://www.wribrasil.org.br/noticias/regeneracao-natural-de-florestas-captura-carbono-mais-rapido-do-que-se-pensava> Acesso em: 22 de outubro de 2025

66. YUAN, Xiangning; LI, Sien; CHEN, Jinliang; YU, Haichao; YANG, Tianyi; WANG, Chunyu; HUANG, Siyu; CHEN, Haochong; AO, Xiang. *Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review*. *Agronomy*, v. 14, n. 7, art. 1360, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>.
67. **Zhang, Xiangbo; Lei, Lei; Lai, Jinsheng; Zhao, Haiming; Song, Weibin et al.** Effects of drought stress and water recovery on physiological responses and gene expression in maize seedlings. *BMC Plant Biology*, London, v. 18, art. 68, 2018. doi: <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1281-x>.