LUISA TEODORO

SACHÊS BIODEGRADÁVEIS: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO NA EMERGÊNCIA DE PLÂNTULAS DE TOMATE

Londrina
2026

LUISA TEODORO

SACHÊS BIODEGRADÁVEIS: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO NA EMERGÊNCIA DE PLÂNTULAS DE TOMATE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia.
Orientador: Prof. Dr. Fábio Yamashita
Coorientador: Prof. Dr. André Luiz M. de Oliveira

Londrina
2026

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

TEODORO, LUISA.
SACHÊS BIODEGRADÁVEIS: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO NA EMERGÊNCIA DE PLÂNTULAS DE TOMATE / LUISA TEODORO. - Londrina, 2026.
75 f. : il.

Orientador: FÁBIO YAMASHITA.
Coorientador: ANDRÉ LUIZ MARTINEZ DE OLIVEIRA.
Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Polímeros biodegradáveis - Tese. 2. Semente de tomate - Tese. 3. Ácidos Húmicos - Tese. 4. Taninos - Tese. I. YAMASHITA, FÁBIO. II. MARTINEZ DE OLIVEIRA, ANDRÉ LUIZ. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. IV. Título.

CDU 66

LUISA TEODORO

SACHÊS BIODEGRADÁVEIS: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO NA EMERGÊNCIA DE PLÂNTULAS DE TOMATE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio Yamashita
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Claudemir Zucareli
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof.ª Dr.ª Suzana Mali de Oliveira
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 22 de junho de 2026.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Fábio Yamashita pelo apoio, paciência e compreensão, e pelo senso de aventura ao explorarmos algo inédito.

Ao Professor André Luiz M. de Oliveira, pelas ideias inovadoras e acompanhamento bem-humorado.

À Dra. Fabíola A. de Carvalho, pela ajuda inestimável na metodologia, pelo conhecimento e as risadas compartilhadas. Pela leveza no trato e solicitude.

À Dra. Elizandra M. de Oliveira, que muito admiro, pelas correções de texto e incentivos a continuar. Mesmo com um oceano de distância entre nós, sempre esteve presente nos momentos em que precisei. Obrigada.

RESUMO

TEODORO, Luisa. **Sachês biodegradáveis: desenvolvimento e aplicação na emergência de plântulas de tomate.** Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Biotecnologia). Londrina, 2026.

Polímeros biodegradáveis têm encontrado sucesso em aplicações agrícolas, com potencial benéfico para solos e culturas. Este estudo objetivou desenvolver sachês biodegradáveis para o acondicionamento de sementes de tomate (*Solanum lycopersicum*) e avaliar seu efeito sobre a emergência das plântulas. Os filmes biodegradáveis foram obtidos por extrusão e sopro em duas composições: PBAT/ATP (poli(butileno adipato-co-tereftalato) 30%, amido de milho 48,90%, glicerol 21%, ácido cítrico 0,10%) e PBAT/ATP-TAH (redução do amido para 47,75%, adição de taninos vegetais 1% e ácidos húmicos 0,15%), avaliados íntegros ou microperfurados por rolo de agulhas. Os filmes foram caracterizados quanto à cor, espessura, perda de massa em água (PMA), permeabilidade ao vapor d'água (PVA), alongamento na ruptura (A), módulo de Young (MY) e resistência máxima à tração (RMT). Os aditivos alteraram a coloração dos filmes (ΔE 29,67 entre composições), sem efeito significativo sobre a espessura, PVA ou PMA. A microperfuração de PBAT/ATP-TAH aumentou sua PMA (de 25,63% para 36,49%) e RMT (3,15 para 3,59 Mpa), sem efeito significativo sobre A. Inversamente, a microperfuração de PBAT/ATP reduziu sua RMT (de 3,38 para 2,87 MPa) e A (de 25,68% para 16,51%). Não houve efeito significativo dos fatores sobre o MY. Os filmes foram selados na forma de sachês e receberam as sementes puras ou tratadas com *T. harzianum*. Em ensaio de emergência de plântulas, os tratamentos sem sachê obtiveram resultados melhores que as sementes acondicionadas: menor tempo médio de emergência (7 dias contra 10 dias), maior percentual de plântulas emergidas (E) (82% contra 53%) e maior índice de velocidade de emergência (IVE) (2,77 contra 1,37). Dos tratamentos com sachê, T4 (PBAT/ATP-TAH) e T10 (PBAT/ATP-TAH, microperfurado, com *T. harzianum*) tiveram os melhores resultados (E 67,61% e 62,50%; IVE 1,77 e 1,55). Apesar do efeito bioestimulante dos aditivos em PBAT/ATP-TAH, o acondicionamento de sementes nos sachês foi desfavorável ao desenvolvimento inicial das plantas de tomate.

Palavras-chave: Ácidos húmicos, Taninos, Semente de tomate, *Trichoderma harzianum*, Embalagem biodegradável.

ABSTRACT

TEODORO, Luisa. **Biodegradable sachets: development and application in tomato seedling emergence.** Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Biotecnologia). Londrina, 2026.

Biodegradable polymers have been successfully used in agricultural applications, with potential benefits for soils and crops. This study aimed to develop biodegradable sachets for packaging tomato seeds (*Solanum lycopersicum* L.) and evaluate their effect on seedling emergence. Biodegradable films were obtained by extrusion and blown film extrusion in two compositions: PBAT/ATP (poly(adipate-co-terephthalate) 30%, corn starch 48.90%, glycerol 21%, citric acid 0.10%) and PBAT/ATP-TAH (starch reduced to 47.75%, addition of plant tannins 1% and humic acids 0.15%), and evaluated as intact or microperforated using a needle roller. The films were characterized by color, thickness, water mass loss (WML), water vapor permeability (WVP), elongation at break (A), Young's modulus (YM), and maximum tensile strength (MTS). The additives altered the color of the films (ΔE 29.67), with no significant effect on thickness, WVP, or WML. Microperforation of PBAT/ATP, compared to the intact film, decreased MTS (from 3.38 to 2.87 MPa) and A (from 25.68 to 16.51%). In contrast, microperforated PBAT/ATP-TAH showed an increase in MTS (from 3.15 to 3.59 MPa), with no significant effect on A. No significant impact of microperforations or composition was observed on YM. The films were sealed into sachets, inside which seeds were packaged, either pure or treated with Trichoderma harzianum. In a greenhouse seedling emergence assay, naked seeds performed better than packaged seeds: lower mean emergence time (7 days versus 10 days), higher percentage of emerged seedlings (E) (82% versus 53%), and a higher emergence speed index (ESI) (2.77 compared to 1.37). Among the sachet treatments, T4 (PBAT/ATP-TAH) and T10 (PBAT/ATP-TAH, microperforated, with T. harzianum) presented the best results (E 67.61% and 62.50%; ESI 1.77 and 1.55). Sachet packaging was disadvantageous for proper initial development of tomato plants.

Keywords: Humic acids. Tannins. Tomato seed. *Trichoderma harzianum*. Biodegradable packaging.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8

2 OBJETIVOS 11

2.1 OBJETIVO GERAL 11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12

3.1 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS 12
3.1.1 Poli (adipato co-tereftalato de butileno) (PBAT) 13
3.1.1.1 Biodegradabilidade do PBAT 15
3.1.2 Amido 16
3.1.3 Blendas PBAT/ATP 18
3.2 ÁCIDOS HÚMICOS 20
3.3 TANINOS VEGETAIS 21
3.4 EXTRUSÃO DE FILMES POLIMÉRICOS POR SOPRO 22
3.5 SEMENTES DE TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*) 25
3.6 TRATAMENTO BIOLÓGICO DE SEMENTES 29
3.6.1 *Trichoderma harzianum* 30

4 MATERIAL E MÉTODOS 32

4.1 MATERIAL 32
4.2 MÉTODOS 32
4.2.1 Produção dos Filmes Biodegradáveis por Extrusão por Sopro 32
4.2.1.1 Microperfuração dos filmes 33
4.2.2 Caracterização dos filmes biodegradáveis 34
4.2.2.1 Colorimetria 34
4.2.2.2 Espessura dos filmes 34
4.2.2.3 Perda de massa em água 34
4.2.2.4 Permeabilidade ao vapor de água 35
4.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura 35
4.2.3 Tratamento das Sementes 36
4.2.2.1 Tratamento biológico com fungo *Trichoderma harzianum* 37
4.2.2.2 Acondicionamento das sementes nos sachês biodegradáveis 37
4.2.3 Avaliação de emergência das plântulas de tomate 37
4.2.3.1 Análise estatística 38

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 39

5.1 FILMES PRODUZIDOS POR EXTRUSÃO SOPRO EM BALÃO 39
5.1.1 Aparência e Cor 39
5.1.2 Espessura 43
5.1.3 Perda de Massa em Água 44
5.1.4 Permeabilidade ao Vapor de Água 45
5.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura 46
5.1.6 Propriedades mecânicas 48
5.2 AVALIAÇÃO DA EMERGÊNCIA DAS SEMENTES DE TOMATE 51
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES 60
6.1 CONCLUSÕES 60
6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS 60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62

1 INTRODUÇÃO

A substituição de polímeros convencionais não-biodegradáveis por alternativas biodegradáveis tornou-se prioridade no desenvolvimento de materiais, sendo alvo de estudos e de regulamentações com o objetivo de reduzir a acumulação de resíduos plásticos e microplásticos no meio ambiente. Na agricultura, dentre outras aplicações, a utilização de polímeros é comum no recobrimento de sementes, onde visa proteger os princípios ativos que possam compor o tratamento, bem como melhorar as características físicas da semente (De Oliveira, 2009; European Commission, 2023; Majeed *et al.*, 2015).

Certas culturas apresentam desafios particulares que podem ser contornados por estratégias de recobrimento ou acondicionamento. O tomate (*Solanum lycopersicum*), por exemplo, possui importância socioeconômica expressiva no Brasil (ABIC, 2024; Brasil, 2024; EMBRAPA, 2022; IBGE, 2023; IBGE, [s.d]), contudo, suas sementes são pequenas e leves, características que dificultam o manuseio e a semeadura direta. Assim sendo, torna-se interessante o uso de materiais que alteram sua forma e peso para facilitar a semeadura, seja manual ou mecanizada (Oliveira, 2006; Talamini; De Oliveira, 2011; Pereira *et al.*, 2015; Paravar *et al.*, 2023; Podzorov *et al.*, 2024).

Os polímeros biodegradáveis são materiais que podem ser utilizados para tal finalidade, pois são capazes de alterar as características físicas da semente sem causar toxicidade à planta ou permanecer indeterminadamente no solo. Os polímeros biodegradáveis podem ser aplicados através das técnicas convencionais de recobrimento, como *film coating* (Vercelheze *et al.,* 2019), ou por técnicas menos exploradas, como no acondicionamento de sementes em tapetes ou fitas (He *et al.,* 2026; Podzorov *et al.,* 2024).

As blendas de poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) e amido, por exemplo, permitem a obtenção de filmes flexíveis e termosseláveis, combinando a elevada processabilidade do PBAT com a elevada biodegradabilidade do amido (Olivato *et al.*, 2011). Além disso, a utilização de blendas PBAT/amido é interessante para viabilização econômica do uso destes materiais, pois apresenta custo menor que a utilização do PBAT puro e maior versatilidade de aplicações do que filmes de amido puro. As blendas PBAT/amido têm encontrado aplicações na agricultura como, por exemplo, na liberação controlada de fertilizantes (Weng *et al.,* 2023).

Os filmes podem ser obtidos através de extrusão e sopro, uma metodologia convencional na indústria de polímeros, sendo que as propriedades do material final podem ser moduladas por parâmetros de processamento, como temperatura e taxa de alimentação da extrusora (Lekube *et al.,* 2019), tratamentos prévios, como a modificação do amido (Zhang *et al*., 2025), ou tratamentos posteriores, como a microperfuração (Winotapun *et al.,* 2014). Devido à característica hidrofóbica do PBAT e hidrofílica do amido, a utilização de agentes compatibilizantes é indispensável para obtenção de blendas homogêneas, sendo que escolha do compatibilizante para uma blenda também afeta suas propriedades. Dentre as propriedades moduláveis por estes fatores estão as propriedades mecânicas, as propriedades ópticas, as propriedades de barreira, bem como outras características dos filmes (Küster *et al.*, 2025).

Além disso, as blendas de polímeros biodegradáveis podem ser incorporadas de outros aditivos na sua composição para modulação das propriedades dos materiais finais ou para entrega de princípios ativos. Considerando-se a aplicação na agricultura, alguns aditivos podem atuar em benefício do desenvolvimento da planta por possuírem ação bioestimulante, como os ácidos húmicos (Lu *et al.,* 2023), ou antimicrobiana para patógenos de solo, como os taninos vegetais (Ma *et al.,* 2022; Moreira *et al.,* 2023).

Paralelamente, o tratamento de sementes com o fungo benéfico *Trichoderma harzianum* é uma estratégia amplamente consolidada para a promoção do crescimento vegetal e controle de patógenos de solo (Abreu; Pfenning, 2019). Em relação às blendas de PBAT/amido, fungos do gênero *Trichoderma* também são capazes de promover a degradação do PBAT no solo, com ação direta e indireta, através da reestruturação da composição e indução de expressão gênica da microbiota do solo (Wang *et al.,* 2025; Rusetskaya *et al.,* 2024).

Nos últimos anos, a investigação de técnicas de processamento, composições e aditivos de blendas de PBAT e amido foram alvo de numerosos estudos, com foco na melhoria das propriedades dos filmes para aplicação na embalagem de alimentos, porém, ainda há significativo potencial não explorado da aplicação deste material em diversas áreas (Küster *et al.*, 2025). Estudos relacionados à exploração de diferentes composições de polímeros biodegradáveis, combinação com tratamentos novos e estabelecidos e técnicas de aplicação são fundamentais para maior entendimento do efeito desses materiais na agricultura.

Portanto, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de filme de polímero biodegradável, explorando a combinação de blenda de PBAT e amido com aditivos com efeito bioestimulante (ácidos húmicos e taninos vegetais), realização de microperfurações nos filmes para facilitação da biodegradação e troca gasosa, e aplicação dos filmes na forma de “sachês” no acondicionamento de sementes de tomate, em metodologia inédita, para avaliação do seu efeito sobre o desenvolvimento inicial das plantas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver sachês de filmes biodegradáveis para acondicionamento de sementes e avaliar seu efeito sobre a emergência das plântulas de tomate.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver filmes biodegradáveis à base de PBAT, amido, ácidos húmicos e extrato de taninos vegetais;
- Caracterizar os filmes biodegradáveis, íntegros e microperfurados por rolo de agulhas;
- Produzir sachês a partir dos filmes biodegradáveis, íntegros e microperfurados, para acondicionamento de sementes de tomate sem tratamento e tratadas com *Trichoderma harzianum*;
- Avaliar a influência do acondicionamento em sachês biodegradáveis e do tratamento biológico com *Trichoderma harzianum* sobre parâmetros de emergência de plântulas de tomate em casa de vegetação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS

Polímeros degradáveis são materiais de origem natural ou sintética passíveis de degradação térmica, mecânica, oxidativa ou biológica. Quando a degradação resulta da ação de microrganismos de ocorrência natural, como bactérias, fungos e algas, é chamada de biodegradação, e as aplicações de polímeros biodegradáveis devem ser planejadas para performar por períodos finitos, prevendo a deterioração de suas propriedades químicas e físicas (ASTM-D883, 2017).

O período de degradação varia conforme as propriedades intrínsecas do material, como sua composição e estrutura física, e as condições às quais é exposto, incluindo a atividade biológica do meio (Jha *et al*., 2024; Rychter *et al.,* 2010). De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora 15448-2, são considerados biodegradáveis os materiais que sofrem degradação de pelo menos 90% da massa inicial em um período de até 6 meses, resultando em produtos de baixa massa molar (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008).

A substituição de polímeros sintéticos convencionais por alternativas biodegradáveis é uma estratégia para mitigar os graves problemas decorrentes da acumulação de resíduos plásticos no meio ambiente (Weng *et al.*, 2013). A publicação de novas diretrizes, leis e projetos de lei em diversos países em prol da redução do uso de polímeros não biodegradáveis (principalmente plásticos de uso único) impulsiona a busca por alternativas para substituição dessas aplicações (BRASIL, 2022; European Commission, 2023; Jha *et al.,* 2024), todavia, alguns entraves precisam ser superados para a viabilização plena da substituição dos plásticos convencionais em larga escala, dentre estes a redução de custos dos materiais, as dificuldades operacionais para produção em larga escala e o entendimento do comportamento dos polímeros biodegradáveis nos ambientes em que são inseridos (Bandopadhyay *et al.,* 2018; Wu *et al.*, 2021).

Neste sentido, a biodegradação no solo é estudada para avaliar o uso de polímeros biodegradáveis em práticas agrícolas (como no transplante de mudas e o uso como cobertura do solo, chamado *mulching*) (De Carvalho *et al.,* 2021; Weng *et al.,* 2023; Zhai *et al.,* 2023). A composição do solo pode influenciar a decomposição de um material, por apresentar populações microbianas que variam conforme a localidade e até mesmo a sazonalidade, bem como impactar a atividade biológica por sua

capacidade de retenção de água, difusão de gases e transferência de calor, entre outras características (Jha *et al*., 2024). Por outro lado, os polímeros biodegradáveis podem estimular a atividade microbiana, e diferentes composições afetam os microrganismos do solo de maneiras distintas (Bandopadhyay *et al.,* 2018; Moreira *et al.,* 2018; Li *et al.,* 2024b; Rychter *et al.,* 2010).

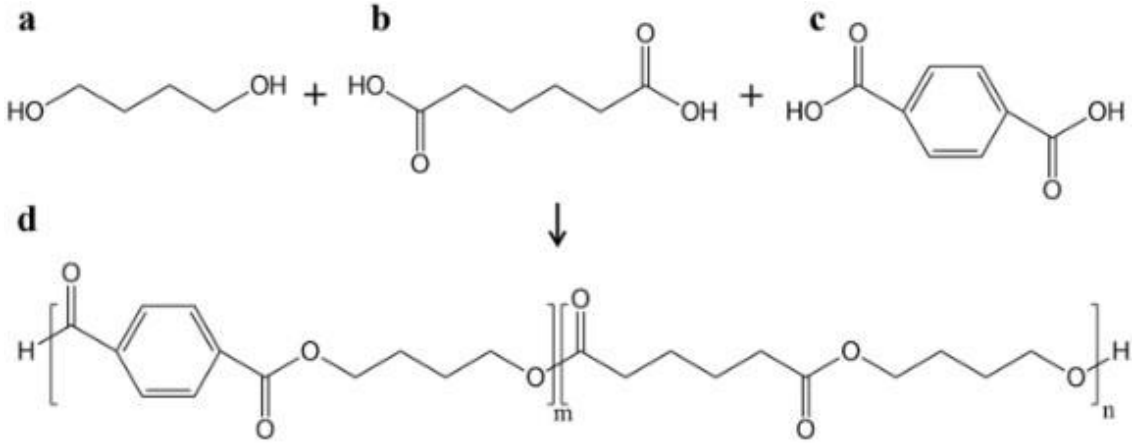
Quanto à composição, o uso de blendas visa melhorar as propriedades de processamento e reduzir o custo final do produto (Leal *et al*., 2019). Para este fim, materiais como amido, farinhas e lignina, de baixo custo, podem ser utilizados em conjunto com polímeros mais caros, como o álcool polivinílico (PVA) (De Carvalho *et al.,* 2017), o ácido polilático (PLA) (Reis *et al*., 2018) e o poli(adipato co-tereftalato de butileno) (PBAT) (Zanela *et al.*, 2024), sem comprometer a qualidade e, muitas vezes, expandindo as possibilidades de uso (Moreira, 2019; Silva *et al.*, 2023; Wu *et al.,* 2021).

3.1.1 Poli (adipato co-tereftalato de butileno) (PBAT)

Pertencente à classe dos polímeros não renováveis, o PBAT é obtido por meio da policondensação de hidrocarbonetos derivados do petróleo: a condensação de 1,4-butanodiol com os ácidos tereftálico e adípico, sob vácuo, a temperaturas superiores a 190 °C (Figura 1). Assim, o PBAT é um polímero semicristalino, termoplástico, altamente apolar e viscoso, que pode ser completamente biodegradado (Küster *et al.,* 2025; Luo *et al.,* 2024; Zhai *et al.*, 2024). A degradabilidade do PBAT é dependente da sua estrutura química e das condições ambientais, sendo degradável por ação enzimática de bactérias, fungos e algas, bem como por processos não-enzimáticos, como hidrólise química e degradação térmica (Ma *et al.,* 2023).

O ponto de fusão do PBAT está entre 115 e 125 °C, similar ao policloreto de vinila (PVC) e ao polietileno (PE). O PBAT apresenta elevada flexibilidade, com módulo de Young entre 20 e 35 MPa, resistência à tração entre 32 e 36 MPa e maior alongamento na ruptura (próximo de 700%) que a maioria dos poliésteres biodegradáveis, como o ácido polilático (PLA) e o polibutileno succinato (PBS), e comparável às propriedades do polietileno (PE). As propriedades do PBAT podem ser modificadas de acordo com as variáveis de processamento escolhidas para sua síntese, bem como a composição de monômeros escolhida, afetando o peso molecular do PBAT (Ferreira *et al.,* 2019).

Figura 1. Ilustração da síntese do poli(adipato co-tereftalato de butileno) (PBAT): (a) 1,4-butanodiol, (b) ácido adípico, (c) ácido tereftálico, (d) PBAT.



Fonte: Küster *et al.,* 2025.

A elevada processabilidade do PBAT o torna apropriado para compor blendas com materiais mais rígidos (como nanocristais de celulose) e permite que seja reforçado com outros materiais (por exemplo, com o PLA). Além disso, a combinação de PBAT com outros materiais de menor valor de mercado (como o amido) tem sido alvo de interesse da comunidade científica como estratégia de redução de custos pois, apesar de apresentar melhor custo-benefício entre os plásticos biodegradáveis, o custo do PBAT quando comparado ao polietileno, por exemplo, é 2 a 3 vezes superior, o que limita sua aplicação em larga escala na substituição de plásticos não-biodegradáveis, mesmo quando suas propriedades mecânicas são equiparáveis às dos polímeros convencionais (Liu *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2023).

Para a produção destes materiais, existem três métodos principais utilizados: a polimerização *in situ*, moldagem por solvente (*solvent casting*) e a mistura por fusão (*melt blending*), cada um com suas vantagens e desvantagens. O método mais comum para a produção destes materiais é a mistura por fusão (*melt blending*), via extrusão ou injeção em molde, no qual a elevada taxa de cisalhamento é responsável por promover a dispersão e distribuição dos materiais na matriz polimérica (Küster *et al.,* 2025).

Neste contexto, o desenvolvimento de blendas de PBAT com materiais de menor custo (como fibras naturais, amido e argilas) surge como uma alternativa para viabilizar seu uso, com diversas aplicações das blendas obtidas, como em embalagens alimentícias e em aplicações agrícolas (Balan *et al.,* 2021; Han; Park, 2020; Venkatesan *et al.,* 2023; Wei *et al.,* 2016; Weng *et al.,* 2023; Zhai *et al.,* 2023).

3.1.1.1 Biodegradabilidade do PBAT

A parcela não cristalina da estrutura do PBAT, o adipato de butileno, tem maior taxa de degradação do que a parcela cristalina de tereftalato de butileno. O segmento alifático do PBAT, representado pelo ácido adípico, contribui para o aumento da flexibilidade e biodegradabilidade, à medida que o grupo butileno adipato contém ligações éster suscetíveis à hidrólise e ataque microbiológico, enquanto o segmento aromático, dado pelo ácido tereftálico, melhora as propriedades mecânicas, como alongamento na ruptura e resistência à tração, porém, diminui a biodegradabilidade do material. Dessa forma, as formulações do PBAT devem equilibrar tais componentes para que o material mantenha sua característica biodegradável enquanto atende as propriedades necessárias para a aplicação desejada (Ferreira *et al.,* 2019).

No meio ambiente, o PBAT é considerado um polímero insolúvel em água (Luo *et al.,* 2024; Zhai *et al.*, 2024), e sua biodegradação é dependente, principalmente, da presença de enzimas como as cutinases (Nilsson *et al.,* 2025; Yang *et al.,* 2023). Enquanto diversos microrganismos são conhecidamente capazes de promover a biodegradação do PBAT, a variabilidade da microbiota presente nos solos impacta significativamente a velocidade de biodegradação do PBAT, conforme evidenciado pelo estudo de Han *et al.* (2021), no qual a taxa de degradação do PBAT variou de 0,3 a 16% em quatro solos de origens diferentes, sob as mesmas condições de temperatura e luminosidade.

Em relação ao impacto ambiental, estudos com PBAT em solo não demonstraram fitotoxicidade aparente a curto prazo, nem efeitos tóxicos significativos sobre microrganismos do solo e da rizosfera, mas há indicações de que o PBAT pode favorecer o desenvolvimento de alguns gêneros de fungos em comparação a outros, reduzindo a diversidade taxonômica apesar de aumentar a diversidade funcional no microbioma do solo, ou seja, o espectro de ação dos metabólitos produzidos pelos microrganismos do solo (Alcaraz-Dólera *et al.,* 2026; Lu *et al.,* 2024; Rychter *et al.,* 2010; Shi *et al.,* 2025).

Na pesquisa de He *et al.* (2025), três microrganismos (*Trichoderma harzianum, Bacillus cereus* e *Pseudomonas fluorescens*) foram avaliados e associados positivamente à aceleração da degradação de PBAT em solo, com *Trichoderma harzianum* resultando em aumento de 70% na taxa de degradação do PBAT em 360

dias. Ao avaliar o mecanismo de promoção da degradação, os autores concluíram que a atuação do microrganismo escolhido não se restringiu à própria atividade metabólica, mas também se deu por meio da promoção de ação sinérgica com o microbioma do solo: a inoculação dos microrganismos alterou a população microbiana do solo, acelerando o rompimento de ligações carbono-oxigênio e de carbonila do PBAT.

De acordo com Rusetskaya *et al.* (2024), o PBAT pode impactar positivamente o crescimento fúngico de *Trichoderma harzianum* tanto em meio de cultura Sabouraud quanto em solo, devido às mudanças físico-químicas decorrentes da presença e do processo de degradação do polímero, como o aumento da disponibilidade de nutrientes no meio, sendo que o *Trichoderma harzianum* é capaz de utilizar o PBAT como sua única fonte de carbono (Alcaraz-Dólera *et al.,* 2026).

Outros autores apontam que a presença de PBAT no solo pode comprometer a disponibilidade de nutrientes, promover estresse oxidativo e inibir o crescimento das plantas (Adamczyk *et al.,* 2024). Por outro lado, conforme estudo de Jiang *et al.* (2026), a utilização de *Trichoderma harzianum* em combinação com PBAT em plantas de tomate indicou que a presença do microrganismo foi capaz de aliviar os sintomas da toxicidade do PBAT por meio da secreção de uma enzima similar à cutinase.

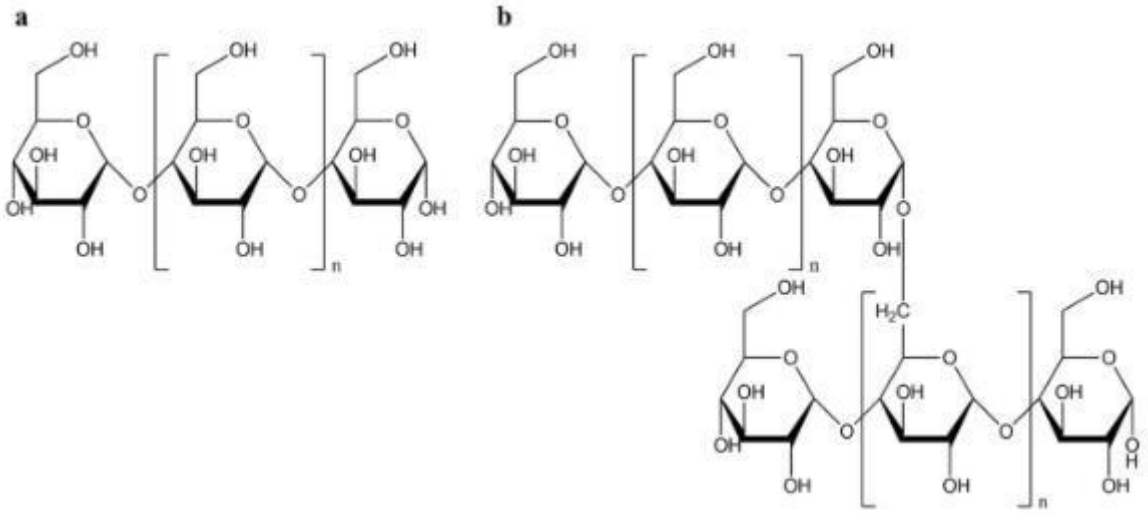
3.1.2 Amido

O amido é um material obtido a partir de fontes vegetais renováveis e abundantes: presente nas plantas, sua função é a de carboidrato de reserva, sendo sintetizado pela fotossíntese e armazenado em órgãos como sementes, raízes e tubérculos. As fontes de amido podem ser de grandes culturas (como milho, mandioca e trigo), bem como de cultivos não convencionais (como banana, pinhão, ervilha e lentilha) (Denardin; Silva, 2009; Laranjeira, 2021; Müller *et al.,* 2020).

A estrutura do amido é de um homopolissacarídeo composto por cadeias de amilose e de amilopectina (Figura 2), cujas proporções variam conforme o vegetal de origem do amido. Na amilose, as unidades de glicose são unidas por ligações glicosídicas (α-1,4) e formam estruturas lineares e amorfas, o que permite a formação de filmes, enquanto na amilopectina a estrutura é altamente ramificada e cristalina, pois as ligações glicosídicas são (α-1,4) e (α-1,6), conferindo viscosidade quando em solução. Nos grânulos de amido, cuja estrutura é mantida por ligações de hidrogênio, as cadeias de amilose e amilopectina estão dispostas de forma concêntrica, com

regiões mais organizadas (cristalinas) e menos organizadas (amorfas) (Bressanin, 2010; Denardin e Silva, 2009; Vercelheze *et al.,* 2019).

Figura 2. Representação da estrutura química das frações do amido: amilose (a) e amilopectina (b).



Fonte: Küster *et al.,* 2025.

Os materiais à base de amido puro têm aplicações industriais limitadas por serem quebradiços e altamente hidrofílicos (Küster *et al.,* 2025). Para contornar essas limitações, o amido pode ser plasticizado por meio da adição de plastificantes e do processamento térmico, formando o chamado amido termoplástico (ATP). A função dos plastificantes e do aquecimento é desestruturar o amido granular pela ruptura de ligações de hidrogênio entre as macromoléculas de amido (Küster *et al.,* 2025; Vercelheze *et al.,* 2019).

Os plastificantes mais citados na literatura são glicerol, sorbitol ou misturas destes. Essa modificação de amido em ATP é comumente realizada em processos de extrusão, o que permite que os grupos funcionais sejam convertidos em cadeias poliméricas de forma contínua e rápida (Küster *et al.,* 2025). Em geral, os materiais de ATP são higroscópicos e apresentam baixa resistência à tração e ao impacto, além de estabilidade térmica reduzida, mas a modificação dessas características pode ser alcançada por meio da manipulação da combinação e do teor de plastificantes nas formulações (Ren *et al.,* 2009; Wang *et al.,* 2023; Wu *et al.,* 2021; Zhai *et al.,* 2024).

As características opostas e complementares do ATP, quando comparado ao PBAT, permitem otimizar as propriedades da blenda PBAT/ATP conforme desejado.

Além disso, o custo do amido representa cerca de um décimo do custo do PBAT, o que o torna interessante como componente para reduzir o custo das blendas e viabilizar comercialmente os polímeros em diferentes aplicações (Küster *et al.,* 2025).

3.1.3 Blendas PBAT/ATP

As blendas PBAT/ATP têm recebido maior atenção da comunidade científica por apresentarem propriedades semelhantes às dos plásticos convencionais, com a vantagem de serem biodegradáveis e com custo interessante para viabilização industrial. A maior parte dos estudos publicados busca substâncias compatibilizantes para aumentar a interação entre PBAT/ATP e, consequentemente, modular suas propriedades mecânicas, térmicas e de permeabilidade. Também são explorados os efeitos das proporções dos componentes, das condições de processamento, do uso de aditivos e das modificações do amido e das aplicações das blendas. A manipulação dessas propriedades também pode ser interessante para a liberação controlada de ativos (Küster *et al.,* 2025).

O caráter hidrofílico do ATP e o hidrofóbico do PBAT resultam em interações fracas entre si, que podem ser melhoradas pelo uso de aditivos compatibilizantes, mais comumente representados por ácidos orgânicos, como os ácidos málico, cítrico e tartárico. Durante o processamento térmico da blenda, os compatibilizantes podem agir seus grupos carbonila com os grupos hidroxila do amido (por ligações éster), e, simultaneamente, sofrendo transesterificação com as ligações éster do PBAT, formando “pontes” entre os dois componentes da blenda e reduzindo tensão interfacial. Seus grupos carboxila e hidroxila também podem formar interações de hidrogênio com a superfície do amido e do PBAT. Ainda, são capazes de promover hidrólise ácida das cadeias de amilose e amilopectina, facilitando a ação dos plastificantes. O ácido orgânico residual da compatibilização acelera a degradação da blenda PBAT/ATP resultante e pode agir como um plastificante secundário, aumentando a mobilidade das cadeias poliméricas (Beluci, 2023; Garcia *et al.,* 2014; Jiang *et al.,* 2023; Olivato *et al.,* 2012).

O ácido cítrico, por ser um ácido tricarboxílico, é considerado um agente multifuncional: plastificante, agente de ligações cruzadas e compatibilizante. Através do “enxerto” de grupos ésteres na estrutura do amido, o ácido cítrico reduz sua hidrofilicidade e permite melhor interação do amido com poliésteres, como o PBAT.

Blendas de PBAT/ATP com ácido cítrico apresentam superfície de baixa porosidade e estrutura interna mais coesa, sendo as propriedades mecânicas da blenda positivamente influenciadas pela presença deste compatibilizante (Beluci, 2023; Bilck *et al.,* 2021).

Além disso, os próprios plastificantes do ATP, como o glicerol, contribuem na formação das blendas por aumentar o espaço livre entre as moléculas de amido e de PBAT, aumentando a mobilidade das cadeias moleculares e reduzindo a temperatura de fusão da blenda, sendo interessante sua utilização na produção de filmes poliméricos baseados nestes compostos (Bilck, 2015; Jiang *et al.,* 2023; Ren *et al.*, 2009; Wang *et al.,* 2023; Weng *et al.,* 2023; Zhai *et al.,* 2023b).

As condições de processamento na extrusão, como temperatura, velocidade de rosca e alimentação, foram investigadas por Lekube *et al.* (2019). Neste estudo, o parâmetro de taxa de alimentação/vazão do compósito na extrusora afetou diretamente o tamanho de grânulos de amido na matriz e as propriedades de resistência à tração e alongamento na ruptura do filme, devido às maiores forças de cisalhamento atuantes no processo, enquanto a temperatura escolhida para trabalho impactou as propriedades de tensão e transparência do filme soprado.

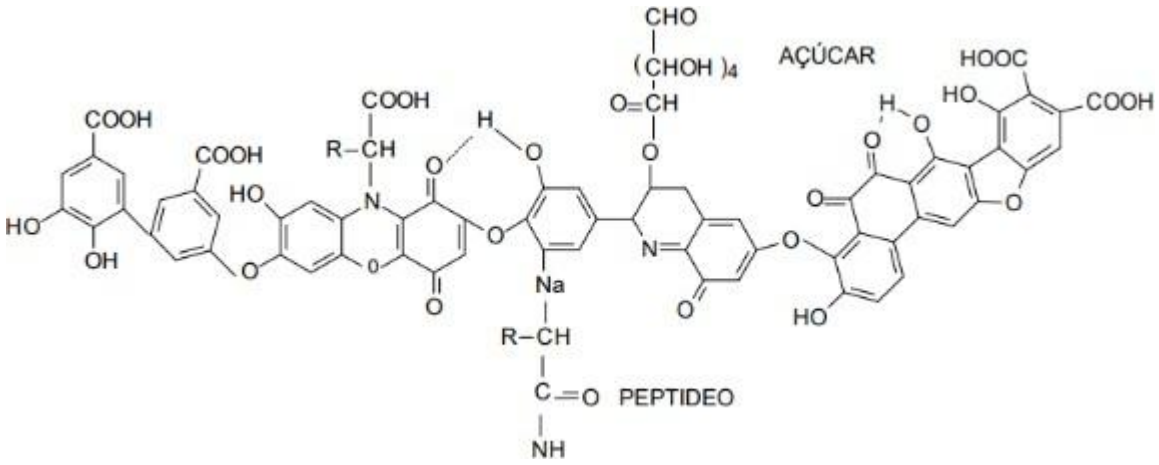
As proporções dos componentes na blenda PBAT/ATP, além de afetar suas propriedades mecânicas, resultam em polímeros com diferentes suscetibilidades à degradação e biodegradação e graus de hidrofobicidade (Liu *et al.,* 2024; Weng *et al.,* 2023; Zhai *et al.*, 2024). Como exemplo, no estudo de Zhai *et al*. (2024), após 180 dias, os autores relataram uma perda de massa de 20% em um filme de PBAT (100% m/m) e de 100% em um filme de blenda PBAT/ATP, confirmando a biodegradabilidade superior da blenda em comparação ao PBAT puro. Além disso, Weng *et al.* (2023) obtiveram resultados positivos com filmes biodegradáveis de PBAT/ATP utilizados na liberação controlada de fertilizantes, com maior degradabilidade no solo observada nos filmes cuja formulação apresentou maior teor de amido.

O efeito da origem do amido e presença de aditivos também foi objeto de estudo de Müller *et al.* (2020), que constatou que a substituição parcial de amido de mandioca por amido de pinhão manteve ou melhorou as propriedades do filme polimérico, enquanto a incorporação de aditivos como extratos de alecrim e chá verde influenciou todas as propriedades físico-químicas do filme, reduziu a permeabilidade ao vapor de água e o grau de opacidade dos materiais.

3.2 ÁCIDOS HÚMICOS

Os ácidos húmicos (AH) são compostos formados de resíduos de matéria orgânica animal e, principalmente, vegetal, por meio de uma série de reações de degradação e síntese. Esses processos resultam em uma união complexa de moléculas, altamente variável quanto à composição e massa molecular, geralmente de coloração escura e com propriedades físico-químicas similares às da fração de matéria orgânica dos solos (Canellas *et al.*, 2005; Stevenson, 1982, *apud* Wei, 2024). Os múltiplos grupos funcionais presentes em sua estrutura, conforme demonstrado na Figura 3, conferem aos ácidos húmicos boa capacidade de troca iônica, ação tampão e atividade fisiológica, o que possibilita seu uso na produção agrícola e industrial, na recuperação ambiental e em áreas da saúde (Canellas *et al.*, 2005).

Figura 3. Representação da estrutura genérica dos ácidos húmicos.



Fonte: Canellas *et al*., 2005.

Apesar de terem ocorrência natural em solos, os AH podem ser utilizados como fertilizantes, pois são capazes de melhorar as propriedades físicas e químicas do solo, bem como o teor de matéria orgânica. Apresentam efeito bioestimulante associado ao crescimento e à absorção de nutrientes via radicular; aumentando a qualidade e o rendimento das culturas, bem como atuando na regulação hormonal das plantas. Os AH também podem ser utilizados em associação com microrganismos de interesse agrícola, bem como enriquecer a microbiota naturalmente associada às plantas, com potencial para estimular o desenvolvimento vegetal e contribuir para a supressão de patógenos (Canellas *et al.*, 2013; Da Silva *et al.,* 2021; Liu *et al.,* 2020).

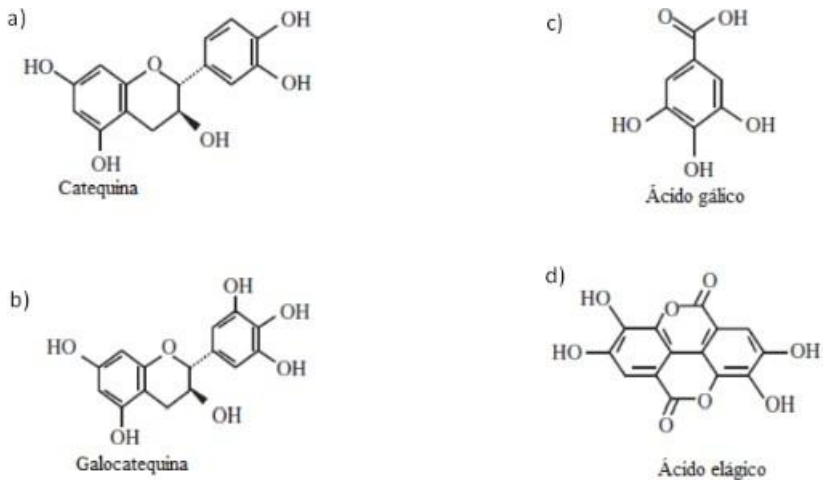
Li *et al.* (2024) avaliaram a adição de AH a filmes de polímero biodegradável à base de álcool polivinílico (PVA), obtido por extrusão e sopro em balão, para detecção de antibióticos no meio ambiente, e observaram que houve melhora nas propriedades mecânicas, aumento da proteção contra radiação ultravioleta (UV) e da resistência à oxidação. No estudo publicado por Lu *et al.* (2023), a combinação de ácidos húmicos e lignina em blenda de PBAT/PLA (ácido polilático) foi utilizada para produzir filmes biodegradáveis que foram aplicados como *mulching* na cultura de tomateiro em estufa. Os resultados obtidos pelos autores foram positivos, com aumento da produtividade, do teor de licopeno, dos açúcares totais e da vitamina C, e redução do teor total de ácidos, em comparação com tomates cultivados em solo coberto com *mulching* de polietileno. Desta forma, observa-se um potencial promissor para a aplicação de AH em filmes poliméricos na agricultura, com possíveis benefícios às suas propriedades físicas e à influência sobre os cultivos.

3.3 TANINOS VEGETAIS

O ácido tânico, ou tanino, pode ser obtido de couro, madeiras, folhas e frutos e, quando proveniente das últimas três fontes, é denominado “tanino vegetal”. Essa classe de compostos divide-se em dois grupos: os taninos hidrolisáveis e os taninos condensados. Os taninos hidrolisáveis apresentam estrutura com núcleo central carbônico ao qual os ácidos carboxílicos fenólicos se ligam por meio de ligações ésteres do ácido gálico. Já os taninos condensados, também chamados não hidrolisáveis, não possuem carboidrato central e são formados pela condensação de precursores de flavonoides ou de polímeros de flavonoides, com subunidades e graus de polimerização variáveis (Figura 4) (De Araújo *et al.,* 2021; Haslam, 1989, *apud* Patra e Saxena, 2010).

Os taninos têm aplicação em diversos setores industriais, como na indústria alimentícia, farmacêutica e na veterinária, devido às suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes (Singh e Kumar, 2020). Na agricultura, a aplicação de taninos em tratamento de sementes ou no transplante de mudas apresenta efeito bioestimulante, favorecendo o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes, podendo ser um auxiliar no controle de patógenos microbianos (Miele *et al*., 2020). Em blendas poliméricas, a incorporação de extratos de taninos vegetais contribui para o aumento da resistência a ataques microbianos, da resistência térmica e da resistência ao impacto (Hao *et al.,* 2022; Ma *et al.,* 2022; Mileti *et al*., 2024).

Figura 4. Representação da estrutura química das unidades monoméricas de taninos condensados (a e b) e hidrolisáveis (c e d).



Fonte: Adaptado de Patra e Saxena (2010).

Na mistura com ATP/glicerol, Ma *et al.* (2022) observaram que a adição de taninos vegetais em baixas concentrações reduziu a taxa de biodegradação no solo, conferindo atividade antibacteriana ao polímero. O estudo de Mileti *et al*. (2024), também tratando da adição de taninos em blenda de ATP/glicerol, corroborou os resultados de Ma *et al.* (2022), além de relatar aumento na hidrofobicidade do material e melhoria na processabilidade dos polímeros para produção de filmes.

Moreira *et al.* (2023) desenvolveram um material à base de PLA/amido/lignocelulose contendo 1% de extrato de taninos e observaram efeito de redução da taxa de biodegradação no solo, devido à atividade antibacteriana, bem como o aumento da hidrofobicidade da blenda e melhoramento da processabilidade do material, neste caso, obtido através de moldagem por injeção. Dessa forma, é notável que a presença de taninos nas composições poliméricas tem influência significativa sobre os parâmetros de processabilidade e de biodegradabilidade dos materiais, podendo estender a vida útil desses materiais.

3.4 EXTRUSÃO DE FILMES POLIMÉRICOS POR SOPRO

A técnica de extrusão de polímeros, que combina aquecimento contínuo com o transporte e mistura da matéria-prima, é amplamente utilizada por ser um processo versátil, de baixo custo e reduzido impacto ambiental, por não gerar efluentes. Durante

a extrusão, ocorrem modificações na estrutura molecular do polímero, que podem ser moduladas por parâmetros como temperatura, taxa de alimentação e velocidade de rosca (Bai *et al.*, 2021).

O material extrusado pode então ser transformado em filmes por meio de extrusão em matriz plana ou por sopro em balão, sendo esta última a técnica mais utilizada por apresentar menor custo e maior produtividade (Scapim, 2009).

A extrusão de filmes por sopro em balão é utilizada tanto em escala piloto quanto em escala industrial, sendo uma importante ferramenta para avaliação da processabilidade dos polímeros, permitindo a modulação de suas propriedades (Küster *et al.,* 2025; Lekube *et al.,* 2019). Por se tratar de equipamento semelhante ao convencionalmente empregado na fabricação de filmes de polietileno, a extrusão acoplada ao sopro em balão pode facilitar a produção em larga escala de filmes à base de novos polímeros aproveitando instalações industriais já existentes (Han e Park*,* 2020; Ren *et al.,* 2009).

Existem diferentes configurações de processamento na extrusora, que podem resultar em filmes de mesma composição, mas com propriedades distintas: Bai *et al.* (2021) investigaram o uso de configurações *one-step* e *two-steps*, ou seja, a extrusão em etapa única e a extrusão em duas etapas e observaram influência nas propriedades dos materiais obtidos. A extrusão em duas etapas resultou em maiores valores de resistência à tração, alongamento na ruptura e resistência ao impacto. Esses resultados foram atribuídos a uma morfologia mais homogênea do polímero final, decorrente de uma desestruturação mais eficiente do amido.

Uma forma de reduzir o tempo de processamento é a produção de polímeros pelo método *one-pot*, onde todos os componentes da blenda são misturados sem tratamento prévio, conforme descrito por Weng *et al.* (2023) e Zhai *et al.* (2023a e 2023b) na produção de filmes de PBAT/ATP (Figura 5). A mistura inicial segue para o processo de fusão e homogeneização dos componentes por extrusão. Dessa etapa obtém-se um material homogêneo, posteriormente granulado na forma de pellets, que podem ser processados em diferentes formatos. De acordo com a metodologia de extrusão em duas etapas, os pellets produzidos são reprocessados em uma segunda extrusão, seguida de sopro em balão. Nesse processo, o material fundido é extrusado através de uma matriz circular com injeção de ar interno, formando-se um tubo inflado (também chamado de balão) cujas paredes são filmes poliméricos. Os controles de taxa de injeção de ar e de velocidade de extrusão permitem ajustar a espessura do

filme, que pode então ser cortado nas dimensões desejadas. Além disso, os filmes produzidos apresentam-se passíveis de termosselagem (Brandelero *et al.,* 2011; Han e Park, 2020; Weng *et al.,* 2023; Zhai *et al.,* 2023b).

Figura 5. Ilustração do processo de produção de filmes poliméricos por extrusão e sopro em balão, considerando metodologia *one pot* para blenda de PBAT/Amido/glicerol e aditivos.



Fonte: Adaptado de Weng *et al*., 2023.

Filmes poliméricos biodegradáveis podem ser submetidos a tratamentos posteriores, como perfuração ou microperfuração, técnica amplamente empregada em filmes para embalagens para frutas e hortaliças *in natura* ou minimamente processadas. Esse procedimento permite modular as trocas gasosas no interior da embalagem e prolongar a vida de prateleira do produto embalado (Pattaraudomchok *et al.,* 2024; Xavier, 2017).

A perfuração pode ser realizada por diferentes métodos, como o uso de lasers ou agulhas, e parâmetros como número, diâmetro e distribuição dos furos influenciam diretamente as propriedades dos filmes, como suas propriedades de resistência à deformação sob tensão e a permeabilidade à troca gasosa do filme (Winotapun *et al.,* 2014). Além disso, as perfurações aumentam a área superficial exposta do material, podendo acelerar o processo de biodegradação do mesmo, uma vez que estes fatores estão intimamente ligados (Chinaglia *et al.,* 2018).

A perfuração mecânica de filmes pode ser realizada através de métodos manuais ou semiautomatizados, com agulhas aquecidas para derretimento de furos ou com agulhas frias, cujas pontas afiadas são capazes de atravessar o material. As vantagens da perfuração mecânica são a sua simplicidade, adaptabilidade e baixo

custo, enquanto a maior dificuldade é manter as perfurações uniformes em tamanho e formato (Kim; Seo, 2018)

3.5 SEMENTES DE TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)

O tomate (*Solanum lycopersicum*) é um alimento difundido em culinárias de todo o mundo, com baixo teor calórico e elevados teores de vitaminas, antioxidantes e minerais. Seu consumo é estimulado por organizações que defendem uma alimentação saudável, como a Organização Mundial da Saúde (OMS) (GAIN, 2020). No Brasil, em 2024, a cultura do tomate ocupou uma área de 60 mil hectares e a produção atingiu R$ 9,9 bilhões (IBGE, s.d.).

O tomate é uma das plantas dicotiledôneas mais amplamente estudadas e investigadas, o que resulta em um conhecimento abrangente e aprofundado sobre seu comportamento, mecanismos de regulação e respostas a diversos fatores, desde estimulantes até estresses. A família à qual pertence, *Solanaceae*, é bastante extensa e tem relação próxima com várias outras culturas comercialmente importantes, como a batata, o tabaco, a pimenta e a berinjela (Brandão Filho *et al.,* 2018). O conhecimento extenso disponível sobre o tomate, aliado à sua relevância agrícola, contribui para que o tomate seja reconhecido como planta ou organismo modelo (Kimura e Sinha, 2008; Liu *et al.,* 2022).

O cultivo do tomate é geralmente iniciado por meio de semeadura em bandejas, seguidas de transplante das mudas para o campo, realizado de forma manual ou mecanizada. As sementes de tomate são pequenas, achatadas e com formato que se assemelha à um rim (reniformes) ou ovaladas, tendo aproximadamente 3 mm de comprimento, 2 mm de largura e 0,5 mm de espessura, com peso individual geralmente entre 2 e 4 mg (Doganlar *et al.*, 2000). Embora a semeadura direta seja possível, a leveza e tamanho diminuto das sementes de tomate, assim como as de outras hortaliças, dificultam o manuseio durante a semeadura, seja ela manual ou mecanizada (Nascimento *et al.*, 2012).

Uma técnica utilizada para facilitar o manuseio de sementes com as características supracitadas é a aplicação de recobrimento (Talamini e De Oliveira, 2011; Paravar *et al.,* 2023). De modo geral, o recobrimento de sementes pode ser classificado em três tipos, conforme apresentado na Figura 6. A peliculização, ou *film-coating*, consiste na aplicação de uma fina camada de material sobre a semente, sem alterar tamanho ou o formato, com aumento de peso de até 10%. A incrustação

caracteriza-se por uma camada de recobrimento mais espessa, resultando em aumento de peso entre 8 e 500%, porém sem alteração significativa da forma. Já a peletização é um processo muito similar a incrustação, mas que compreende a aplicação de uma camada ainda mais espessa, com um aumento do peso de 500 a 5000% e alteração da forma original da semente (Javeed *et al.,* 2022).

Figura 6. Tipos de recobrimento de sementes mais comuns (peliculização, incrustação e peletização) e mudança de tamanho e formato em relação ao original da semente.



Fonte: Adaptado de Paravar *et al.,* 2023.

Atualmente, existem no mercado diversas opções de polímeros, sintéticos e biodegradáveis, para o recobrimento de sementes. A principal forma de aplicação destes materiais é através da dispersão do polímero em meio líquido, que é posteriormente aspergido sobre as sementes (em equipamentos como tratadores de leito fluidizado ou tambores rotativos) ou no qual as sementes podem ser imersas e posteriormente secas (Javeed *et al.,* 2022; Lodi *et al.,* 2024; Paravar *et al.,* 2023).

Como alternativa também para facilitar o manuseio de sementes diminutas, existe a produção de “fitas”, “cordas” ou “tapetes” de sementes (Figura 7), materiais nos quais as sementes são distribuídas uniformemente e espaçadas de forma adequada, conforme a necessidade da cultura. As técnicas mais rudimentares envolviam a disposição das sementes entre folhas de papel ou de fibras de cânhamo, evoluindo, mais recentemente, para o uso de polímeros biodegradáveis (Podzorov *et al.,* 2024). Atualmente, existem empresas como Suttons®, Gurney’s® e Sedos® que comercializam sementes em formatos de fitas, tapetes e cordas, prontas para semeadura (Gurney’s, [s.d.]; Sedos, [s.d.]; Suttons, [s.d.]).

Esta técnica reduz desperdícios e facilita a aplicação precisa de agroquímicos (Podzorov *et al.*, 2024). Nicolosi (2016) destaca a importância da praticidade da semeadura para pequenos agricultores familiares. A utilização de sementes em fitas permite a semeadura mecanizada, embora exija equipamento específico, avanços

tecnológicos recentes e depósito de novas patentes evidencial o potencial de expansão da tecnologia (Chaplygin *et al.,* 2025; Nicolosi, 2016; Zhang *et al.,* 2021).

Figura 7. Sementes de cenoura em fitas e de cebolinha em tapetes, metodologias alternativas ao recobrimento para modificação do formato das sementes.



Fonte: Gurney's Seed and Nursery Co, [s.d.].

A germinação é uma etapa sensível do ciclo de vida dos vegetais, consistindo de uma série de acontecimentos metabólicos ordenados e sincronizados, que podem ser classificados em três fases: na fase I, ocorre a embebição de água (reidratação)

pela semente, desencadeada pelo gradiente de potencial hídrico entre semente e substrato, bem como a retomada da absorção de oxigênio e aumento na atividade respiratória; na fase II, inicia-se intensa atividade metabólica e fisiológica, com formação de hormônios vegetais, enzimas e digestão das reservas energéticas da semente para o crescimento do eixo embrionário, culminando com a protusão da raiz primária, na fase III, acompanhada de aumento constante na absorção de água e atividade respiratória (Carvalho; Nakagawa, 2012). O excesso ou déficit hídrico estão entre os parâmetros que podem originar plântulas pequenas e fracas (Silva *et al.,* 2009).

Em resumo, os fatores que afetam a germinação das sementes são: a água, que desempenha múltiplas funções cruciais, como a facilitação da ruptura do tegumento devido à pressão hidrostática interna da semente; a temperatura, que influencia na difusão da água (embebição) e a atividade enzimática em reações bioquímicas; o oxigênio, pois é essencial para as reações oxidativas do processo respiratório, e, para algumas plantas, a presença de luz (Vieira; Carvalho, 2023).

Portanto, ao submeter as sementes ao processo de recobrimento ou revestimento, o material a ser utilizado neste processo deve ser pensado de forma a não interferir negativamente na germinação e emergência da plântula. Em outras palavras, é importante que exista sincronia entre a degradação do material e o ciclo biológico da semente, para que o recobrimento não atue como barreira à troca gasosa entre semente e ambiente externo (Oliveira *et al.,* 2002).

Podzorov *et al*. (2024) elencaram as propriedades mais importantes dos materiais poliméricos para essa finalidade: os filmes devem apresentar permeabilidade gasosa suficiente para o desenvolvimento do embrião, além de ser hidrofílico para absorver água e perder rigidez estrutural em contato com o solo úmido, eliminando a resistência mecânica ao desenvolvimento da radícula. Os materiais devem ser neutros ou, preferencialmente, benéficos à composição e à microbiota do solo.

Recentemente, o estudo de He *et al.* (2026), explorou a utilização de filmes de polímero biodegradável de nanolignina/quitosana, obtidos por *casting*, como fita para semeadura de sementes de rabanete. No entanto, no que se refere à utilização de filmes de polímero biodegradável de PBAT/ATP, obtidos por extrusão e sopro, como “envelopes” ou “sachês” para o acondicionamento das sementes, metodologia proposta neste trabalho, não foram encontrados relatos até o presente momento. Desta forma, a abordagem aqui apresentada caracteriza-se como uma proposta inédita, sendo, portanto, denominada neste estudo como “acondicionamento”.

3.6 TRATAMENTO BIOLÓGICO DE SEMENTES

A utilização de microrganismos benéficos como princípios ativos no tratamento de sementes, chamada de tratamento biológico, pode beneficiar o crescimento e o desenvolvimento da planta. Além disso, esses ativos biológicos podem auxiliar no enfrentamento de estresses ambientais e ataques de fitopatógenos por meio de mecanismos de ação direta e indireta (Paravar *et al.,* 2023). De maneira geral, o tratamento biológico envolve o uso de adesivos e a adição de uma fonte de carbono, que auxilia na sobrevivência e na fixação do microrganismo à semente, além de protegê-lo contra o ambiente externo. O sucesso desse tipo de tratamento depende tanto da seleção adequada do microrganismo e quanto das características do material de recobrimento, especialmente sua biodegradabilidade e toxicidade (Chandrika *et al.,* 2024; Javeed *et al.,* 2022).

Os microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV), como fungos e bactérias, desempenham atividades como solubilização de compostos inorgânicos, mineralização de compostos orgânicos complexos e liberação de moléculas benéficas, capazes de ativar ou potencializar vias metabólicas da planta. Esses microrganismos são capazes de mitigar diferentes tipos de estresses abióticos, como estresse hídrico, salino e por mudanças extremas de temperatura. Os mecanismos envolvidos variam conforme a espécie microbiana e podem envolver o aumento da atividade antioxidante, a regulação do armazenamento de proteínas, os processos de osmorregulação e a secreção de substâncias umectantes (Savitha; Sankaranarayanan, 2023). Por outro lado, na defesa contra fitopatógenos, estes microrganismos realizam a síntese de compostos antibióticos (antifúngicos e antibacterianos), a competição direta por nutrientes com o patógeno e a indução de resistência sistêmica com liberação de diversos metabólitos (Seth *et al.,* 2023).

Diversos estudos avaliaram a interação de polímeros biodegradáveis de composições variadas com ativos biológicos. Dentre eles, a relação entre blendas de quitosana/celulose/PEG e carboximetilcelulose/PVA com *Trichoderma harzianum* (Chandrika *et al.*, 2024), ácido cítrico/PVA com *Bacillus megaterium* (Lodi *et al.*, 2024), e amido/gelatina/PVA com *Azospirillum brasilense* (Vercelheze *et al.,* 2019). Essas interações geraram resultados positivos, especialmente ao prolongar a viabilidade celular dos ativos biológicos quando expostos ao calor, a defensivos químicos e em

armazenamento por longos períodos (Lodi *et al.,* 2024; Pereira *et al.,* 2023; Vijaykumar *et al.,* 2024).

3.6.1 *Trichoderma harzianum*

Fungos do gênero *Trichoderma* são encontrados em diversas partes do globo, tanto em regiões frias quanto em climas tropicais, como componentes naturais da microbiota do solo. Devido a essa ubiquidade e versatilidade, o gênero é alvo frequente de estudo, consolidando um robusto corpo de conhecimento que tem contribuído para sua ampla aplicação na agricultura. Esses fungos são considerados generalistas por atuarem tanto no controle de fitopatógenos (incluindo outros microrganismos e nematoides) quanto na promoção do crescimento vegetal. Sua eficácia baseia-se em múltiplos mecanismos de ação, cujos efeitos positivos se estendem a muitas espécies vegetais e habitats (Paravar *et al.,* 2023; Ramada *et al.,* 2019).

O sucesso adaptativo de *Trichoderma* em diferentes ambientes está diretamente relacionado às mesmas características que o tornam um agente eficaz de biocontrole de fitopatógenos: alta competitividade por nutrientes com outros microrganismos, produção de enzimas hidrolíticas que degradam a parede celular dos hospedeiros e capacidade de secretar metabólitos secundários, como substâncias antibióticas e moléculas sinalizadores. A eficiência da aplicação de produtos à base desse bioativo depende de diversos fatores, como o método de aplicação e a dosagem adequada (Ramada *et al.,* 2019).

Devido a capacidade dos fungos do gênero *Trichoderma* de colonizar a rizosfera logo no início da germinação, que é considerado uma fase crítica para o estabelecimento da planta, sua aplicação no solo (no sulco) ou no tratamento de sementes torna-se altamente estratégica (Bettiol *et al.,* 2019). A associação de *Trichoderma* ao sistema radicular estimula o crescimento e o desenvolvimento das raízes e da área foliar. Como consequência, tem-se otimização da absorção e utilização de nutrientes, maior resistência a estresses bióticos e abióticos ao longo do cultivo, mitigação de perdas de potencial produtivo e, consequentemente, melhor produtividade (Lobo Junior *et al.,* 2019).

Dentro do gênero *Trichoderma,* a espécie *T. harzianum* é a mais utilizada, representando 66% dos produtos registrados à base de *Trichoderma* no MAPA em 2019 (Bettiol *et al.,* 2019). Este grupo taxonômico engloba uma ampla variedade de espécies filogenéticas, algumas endófitas e outras predominantemente micoparasitas,

que possuem diferentes níveis de atividade antimicrobiana, potencial nematicida e capacidade de induzir benefícios às plantas (Abreu; Pfenning, 2019).

No tratamento de sementes, a associação de produtos à base de *Trichoderma* a materiais de recobrimento pode trazer benefícios à manutenção da viabilidade fúngica durante armazenamento e potencializar suas funções benéficas à planta. Swaminathan *et al.* (2016) observaram tal comportamento em estudo realizado com sementes de trigo e *T. atroviride* em combinação com recobrimentos de polivinilpirridona (PVP), óleo de canola, amido/manitol, metilcelulose e mistura de goma xantana/óleo de canola/bentonita. Os resultados apontaram influência positiva na sobrevivência dos esporos do fungo, mesmo em condições subótimas de armazenamento. De forma semelhante, Kuchlan *et al.* (2017) constataram que a utilização de polímero comercial convencional em associação com *T. viride* no tratamento de sementes de soja resultou em maior crescimento endofítico e incremento de produtividade das plantas quando comparado à aplicação do fungo de maneira isolada.

Em relação a degradação do PBAT, de acordo com Jiang *et al.* (2026) e Rusiecka *et al.* (2026), o fungo *Trichoderma harzianum* é capaz de promover degradação direta e aliviar possíveis fitotoxicidades causadas pelos monômeros do polímero. Além disso, o *T. harzianum* também atua de modo indireto na degradação do PBAT, à medida que induz reestruturação da microbiota do solo em que é inserido com o polímero, com ação sinérgica com os demais microrganismos do solo, e é capaz de influenciar a modulação da expressão gênica da microbiota, que passa a ativamente degradar o PBAT (Rusetskaya *et al.,* 2024; Wang *et al.,* 2025).

Diante dos benefícios da interação polímero-semente e da importância da substituição de polímeros não biodegradáveis por alternativas de menor impacto ambiental nos tratamentos de sementes, a utilização de filmes de PBAT/ATP selados na forma de “envelopes” ou “sachês” surge como uma abordagem inovadora para a alteração de tamanho, forma e peso de sementes de tomate, visando otimizar o manuseio e semeadura. Adicionalmente, as evidências científicas sobre a interação polímero-MPCV e MPCV-semente permite pressupor que este acondicionamento também pode atuar como um suporte protetivo, influenciando positivamente o desenvolvimento de ativo biológico associado, como o fungo *Trichoderma harzianum*.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

Os filmes biodegradáveis foram produzidos com amido de milho (Apti Alimentos Ltda., Brasil), poli (adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT - Ecoflex® F Blend C1200) da BASF (Alemanha), glicerol grau técnico (Dinâmica, Brasil), ácido cítrico P.A. (Dinâmica, Brasil), concentrado de taninos de *Acacia mearnsii* (caráter aniônico, tanantes 71% ± 2, pH 4,5 – 5 (sol. aquosa 20% p/v), Supertan, Tanac, Brasil) e extrato de ácidos húmicos de leonardita (70% ácidos húmicos, 21% K_2O, K-Humate S100®, Omnia, Brasil).

O *Trichoderma harzianum* T22 (nome comercial Trianum DS®) foi cedido pela Koppert do Brasil Sistemas Biológicos Ltda. As sementes de tomateiro da cultivar IPA 6 foram adquiridas da Isla Sementes Ltda. O solo para semeadura foi o produto comercial Terra Boa (Daniel Henrique Zanelato, Brasil), cujas especificações fornecidas pelo fabricante constam na Tabela 1.

e

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Produção dos Filmes Biodegradáveis por Extrusão por Sopro

Os filmes biodegradáveis foram desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia do Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos (DCTA) da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A composição das blendas poliméricas PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH está apresentada, respectivamente, na Tabela 2, tendo como referência estudos prévios da literatura (Moreira *et al.,* 2018; Balan *et al.,* 2020; Kuster *et al.,* 2025).

Tabela 2 - Composição das blendas poliméricas PBAT/ATP, PBAT/ATP*, PBAT/ATP-TAH e PBAT/ATP-TAH*, em percentual mássico (% m/m).

Ingrediente	**PBAT/ATP e PBAT/ATP* (% m/m)**	**PBAT/ATP-TAH e PBAT/ATP-TAH* (% m/m)**
Amido de milho	48,90	47,75
Poli (butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT)	30,00	30,00
Glicerol	21,00	21,00

Ácido cítrico	0,10	0,10
Extrato de taninos vegetais	-	1,00
Ácidos húmicos	-	0,15

Fonte: Autoria própria.

Os ácidos húmicos e os taninos foram previamente solubilizados em glicerol. Em seguida, os demais componentes de cada formulação foram misturados manualmente, seguidos pela adição da solução de ácidos húmicos e taninos. A mistura resultante foi homogeneizada e, por fim, processada em extrusora monorrosca (BGM, EL-25, Brasil), com diâmetro de rosca de 25 mm, comprimento de 750 mm, quatro zonas de aquecimento e matriz circular com seis furos de 2 mm, para a produção de perfis cilíndricos, que foram cortados na forma de *pellets*. O perfil de temperatura da alimentação até a matriz foi de 90/120/120/100 °C, com velocidade de rosca de 35 rpm.

Em seguida, os *pellets* obtidos da primeira etapa foram reinseridos na extrusora. Nesta fase, utilizou-se uma matriz circular de 50 mm de diâmetro com fluxo interno de ar para a produção de filmes tubulares por sopro. O perfil de temperatura da alimentação até a matriz foi de 90/120/120/100/125 °C, com velocidade de rosca de 32 rpm.

Os filmes obtidos foram selecionados quanto à homogeneidade e aspecto visual (ausência de rachaduras e outras imperfeições) e, em seguida, armazenados em sacos plásticos aluminizados para posterior caracterização. A avaliação da presença de falhas e defeitos do material foi realizada com uma câmera fotográfica conectada a um computador (OI-1004, Oivida), empregando-se ampliações de até 1600x e *software* de captura e edição das imagens.

4.2.1.1 Microperfuração dos filmes

Com o objetivo de acelerar a degradação dos sachês e facilitar o processo de germinação das sementes e emergência das plântulas de tomate, os filmes foram submetidos a um processo de microperfuração manual com o auxílio de um rolo de agulhas para microagulhamento dermatológico (DRS50, Derma Roller System®), constituído por 540 agulhas com 0,25 mm de diâmetro e 2 mm de comprimento. Para o procedimento, os filmes foram dispostos sobre uma superfície plana e o rolo foi pressionado em uma única passagem, garantindo que as agulhas atravessassem completamente o material.

4.2.2 Caracterização dos filmes biodegradáveis

4.2.2.1 Colorimetria

Para a análise de cor, utilizou-se o colorímetro CR-410 (Konica Minolta Inc., Japão), com iluminante D65 (luz do dia) e ângulo de visão de 10°. As leituras foram realizadas em cinco pontos distintos de cada amostra e as coordenadas CIELab L*, a* e b* foram registradas A diferença total de cor (∆E*) foi calculada pela comparação dos materiais contendo ácidos húmicos e taninos com os materiais sem a adição destes componentes, usando a Equação 1:

$$\Delta E^{*}=\sqrt{(\Delta L*^{2})}+(\Delta a*^{2})+(\Delta b*^{2}) \quad (1)$$

4.2.2.2 Espessura dos filmes

A espessura dos filmes foi determinada com um micrômetro manual (Mitutoyo, Japão), medindo-se 10 pontos aleatórios em cada amostra para o cálculo da média aritmética (Melo, 2009).

4.2.2.3 Perda de massa em água

A perda de massa em água (PMA) foi determinada de acordo com a metodologia de Gontard *et al.* (1994). Os filmes, com e sem microperfuração, foram recortados em discos de 2 cm de diâmetro, pesados e imersos em frascos Erlenmeyer contendo 50 ml de água destilada. Os frascos foram mantidos sob agitação em agitador orbital (180 rpm) por 24 h à temperatura ambiente. Após esse período, os discos foram recuperados e secos em estufa a 100 °C por 24 h para a determinação da massa não solubilizada. Os filmes, com e sem a presença de microperfurações, foram analisados em triplicata.

Os resultados foram calculados a partir da diferença percentual entre as massas secas inicial e final, conforme Equação 2:

$$PMA = \frac{Mi-Mf}{Mi}\ x\ 100 \quad (2)$$

4.2.2.4 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes foi determinada conforme a metodologia descrita na ASTM E 96-00 (2000) com modificações. As amostras de filmes foram fixadas na abertura circular (60 cm) da cápsula de permeabilidade, com o emprego de graxa de silicone, para garantir que a migração de umidade ocorresse exclusivamente através do filme. No interior das cápsulas foram inseridos recipientes com solução saturada de cloreto de magnésio (UR de 33% a 25 ºC). As cápsulas foram condicionadas em dessecador contendo solução saturada de nitrato de sódio (UR de 64% a 25 °C).

As cápsulas foram pesadas periodicamente e os dados obtidos de ganho de massa (*g*) foram plotados em função do tempo de análise (*t*, em horas) decorrido, e da reta obtida por regressão linear foi determinado o coeficiente angular (*g/t*), que foi utilizado no cálculo para determinação da PVA conforme Equação 3.

$$PVA = \frac{g}{t} \cdot \frac{s}{A.\Delta P} \qquad (3)$$

Onde: *g/t* é o coeficiente angular, *A* corresponde à área disponível para permeação (em m²), *ε* é a espessura média dos filmes (m) e *ΔP* é a diferença de pressão de vapor de água (kPa) entre as superfícies do corpo de prova.

4.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As micrografias da superfície e fratura dos filmes foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia e Microanálise da UEL utilizando um microscópio FEI Quanta 200 (EUA). As amostras foram secas em dessecador a 0% UR por 48 h a 25 °C e foram fraturadas manualmente em nitrogênio líquido, fixadas sobre suportes de alumínio e revestidas com uma fina camada de ouro (Sputter Coater Balzers SCD 050, Baltec, Áustria) (40-50 nm) sob pressão. As amostras foram analisadas utilizando-se um acelerador de voltagem (feixe de elétrons) de 20 kV. A magnitude da observação foi definida no momento da análise.

4.2.2.6 Propriedades mecânicas dos filmes

As propriedades mecânicas de tração foram determinadas em um texturômetro Stable Micro Systems (modelo TA-XT Plus, Inglaterra), conforme a norma ASTM D882-02 (American Society for Testing and Materials, 2002), com modificações. Dez amostras de cada formulação (com e sem microperfuração) foram cortadas no tamanho de 10 x 2 cm e condicionadas em dessecador com 53% UR por 48 h a 25 °C. As amostras foram fixadas às garras de tração do equipamento a uma distância inicial de 50 mm e tracionadas com uma velocidade de 0,8 mm/s. As propriedades determinadas foram resistência máxima à tração na ruptura (MPa), alongamento na ruptura (elongação) (%) e módulo de Young ou de elasticidade (MPa).

4.2.3 Tratamento das Sementes

Os tratamentos das sementes de tomateiro foram realizados em fatorial 2^3 (2 formulações, presença de tratamento biológico, presença de perfurações), conforme o Quadro 1, sendo os procedimentos metodológicos detalhados apresentados nos tópicos a seguir. Cada tratamento foi embalado separadamente em saco plástico aluminizado e impermeável e armazenado em câmara fria até o momento de utilização.

Quadro 1 - Relação dos códigos e tratamentos realizados com sementes de tomate, em esquema fatorial, para semeadura e avaliação da emergência de plântulas em casa de vegetação.

Código	Composição do sachê	Tratamento biológico	Perfurações
T1	Ausente (Controle -)	Não	Não
T2	Ausente (Controle +)	Sim	Não
T3	PBAT/ATP	Não	Não
T4	PBAT/ATP-TAH	Não	Não
T5	PBAT/ATP	Sim	Não
T6	PBAT/ATP-TAH	Sim	Não
T7	PBAT/ATP	Não	Sim

T8	PBAT/ATP-TAH	Não	Sim
T9	PBAT/ATP	Sim	Sim
T10	PBAT/ATP-TAH	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria.

4.2.2.1 Tratamento biológico com fungo *Trichoderma harzianum*

A dosagem do produto comercial Trianum DS® (à base de *Trichoderma harzianum* cepa T22) recomendada pelo fabricante para o tratamento de sementes é de 0,20 a 0,30 kg do produto comercial para cada 100 kg de sementes (Koppert, 2024). Considerando a garantia mínima de 1×10^8 UFC/g, a dosagem recomendada equivale a 2 a 3×10^7 UFC/g de sementes. Antes da aplicação nas sementes, determinou-se a concentração do Trianum DS® em unidades formadoras de colônia (UFC) visando garantir a dosagem por grama de semente, conforme a metodologia de Bettiol *et al.* (2019).

O tratamento biológico das sementes foi conduzido utilizando-se a dosagem intermediária recomendada (0,25 kg do produto comercial por 100 kg de sementes, correspondendo a $2,5 \times 10^7$ UFC/g de sementes) (Koppert, 2024). O Trianum DS® foi disperso em água na proporção de 15 ml por kg de semente. A suspensão foi vertida em sacos plásticos de composição química neutra contendo as sementes previamente pesadas. O sistema foi homogeneizado manualmente com agitação suave para assegurar o recobrimento uniforme das sementes.

4.2.2.2 Acondicionamento das sementes nos sachês biodegradáveis

As sementes de tomate foram acondicionadas individualmente, com auxílio de pinças, em sachês (8 x 8 mm) confeccionados com os filmes biodegradáveis, selados em três laterais. Após acondicionamento, os sachês foram pesados.

4.2.3 Avaliação de emergência das plântulas de tomate

A semeadura foi realizada em bandejas de isopor preenchidas com solo comercial. As sementes foram semeadas a 1 cm de profundidade com espaçamento de 5 cm entre as covas. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente

casualizado, com quatro repetições por tratamento. Cada repetição foi composta por 24 covas semeadas, totalizando 96 covas por tratamento. As bandejas de isopor foram mantidas em casa de vegetação. O volume de água de irrigação foi estabelecido conforme os critérios descritos nas Regras de Análise de Sementes (Brasil, 2025), de modo a manter o substrato umedecido a 60% da sua capacidade de retenção de água, com irrigação diária.

Realizou-se a contagem diária de plântulas normais emergidas durante 14 dias pós-semeadura para os cálculos dos percentuais de plântulas emergidas (E), Índice de Velocidade de Emergência (IVE) e Tempo Médio de Emergência (TME) (Laboriau, 1970, *apud* Rêgo *et al.*, 2017; Maguire, 1962; Silva, 2014).

4.2.3.1 Análise estatística

Conforme o Quadro 1, o experimento apresentou características de assimetria por possuir um bloco fatorial do tipo 2^3 (de T3 a T10, no qual os fatores são composição do filme do sachê, tratamento de semente com *Trichoderma harzianum* e microperfuração do filme) com tratamentos adicionais (T1 e T2) que, por não envolverem o acondicionamento das sementes em sachês, não puderam ser incluídos no esquema fatorial. Dessa forma, para avaliar os resultados de emergência, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com desdobramento de interações quando significativas.

Para comparação dos tratamentos utilizando sachês em relação as sementes nuas, foram estabelecidos contrastes ortogonais específicos, definidos como:

- C_1 (efeito do acondicionamento): comparando os tratamentos T1 e T2 (sementes nuas) a T3 até T10 (sementes acondicionadas em sachês);
- C_2 (efeito do tratamento biológico na semente nua): comparando diretamente T1 com T2;
- C_3 (efeito da composição do filme): comparando T3, T5, T7 e T9 (sachês de composição de PBAT/ATP) com T4, T6, T8 e T10 (sachês de composição de PBAT/ATP-TAH);
- C4 (efeito da perfuração): comparando T3, T4, T5, T6 (sachês sem perfuração) com T7, T8, T9 e T10 (sachês perfurados com rolo de agulhas).

Os resultados de todos os tratamentos também foram submetidos à Análise de Componentes Principais (ACP).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 FILMES PRODUZIDOS POR EXTRUSÃO SOPRO EM BALÃO

5.1.1 Aparência e Cor

Os filmes produzidos com as blendas poliméricas PBAT/ATP, composta por amido, poli(butileno adipato-co-tereftalato), glicerol e ácido cítrico, e PBAT/ATP-TAH, acrescida de taninos e ácidos húmicos apresentaram colorações distintas (Figura 8). Essa diferença foi confirmada pelos resultados da análise de cor (Tabela 3).

Figura 8. Imagens da produção de filmes por extrusão sopro em balão, PBAT/ATP (esquerda) e PBAT/ATP-TAH (direita).



Fonte: Autoria própria.

O filme PBAT/ATP apresentou coloração branca, opacidade, textura homogênea e ausência de bolhas ou rachaduras na superfície. Estas características estão condizentes com os resultados obtidos por outros autores que utilizaram composições semelhantes (Balan *et al.,* 2020; Sousa *et al.,* 2013; Weng *et al.,* 2023; Zhai *et al.,* 2024).

Por sua vez, o filme PBAT/ATP-TAH exibiu coloração amarronzada, opacidade, mantendo a textura homogênea e a integridade da superfície, sem bolhas ou rachaduras. Essa diferença de coloração pode ser atribuída à incorporação de taninos (Liao *et al.,* 2020) e de ácidos húmicos (Li *et al.,* 2024), uma vez que ambos os componentes apresentam, originalmente, coloração marrom-escura.

Com relação aos parâmetros de cor dos filmes, observou que houve diferença significativa entre as formulações. Os valores evidenciaram maior luminosidade (elevado L*) e menor intensidade cromática (a* e b* muito baixos) para o filme PBAT/ATP em relação ao PBAT/ATP-TAH. Este último apresentou tendência ao vermelho (a* positivo) e ao amarelo (b* positivo).

Houve uma expressiva diferença total de cor entre os filmes (ΔE*= 29,67); valores de ΔE* superiores a 1 indicam que a divergência é perceptível ao olho humano (Fullerton *et al.*, 1996), facilitando a distinção entre composições.

Tabela 3. Parâmetros de cor e comparação de diferença de cor entre os filmes biodegradáveis de composição PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH.

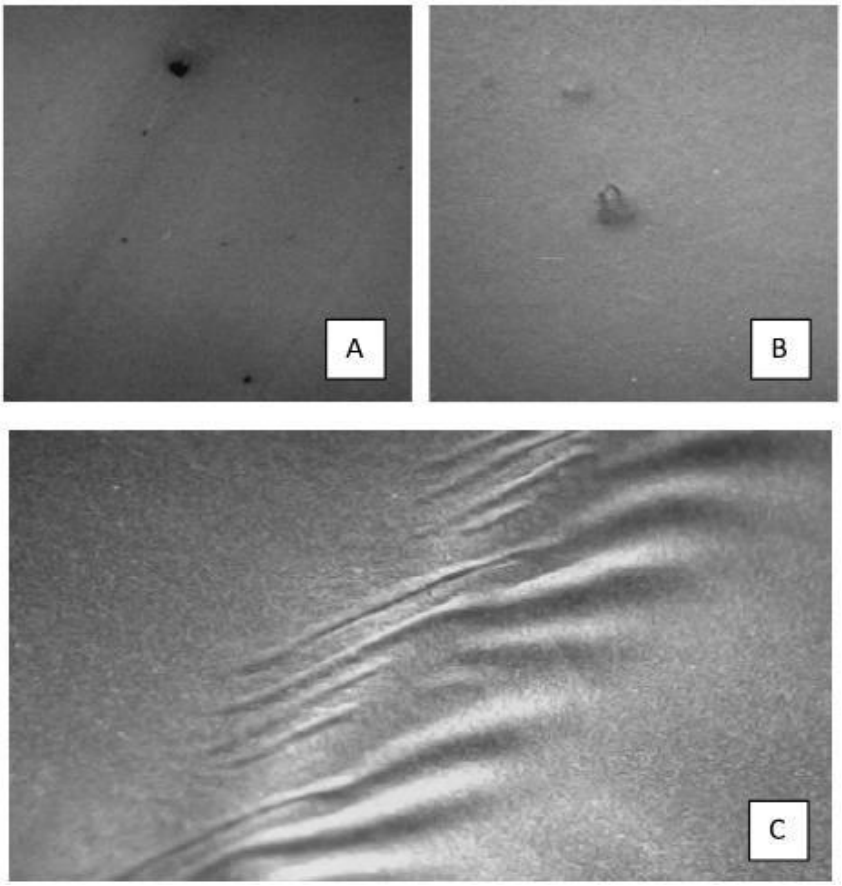
Filme	**L***	**a***	**b***	ΔE*
PBAT/ATP	83,37 ± 0,10^{a}	-1,90 ± 0,01^{b}	1,18 ± 0,06^{a}	-
PBAT/ATP-TAH	60,02 ± 4,88^{b}	5,78 ± 0,76^{a}	17,72 ± 0,04^{b}	29,67

^{a,b} médias com letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa (Tukey, p ≥ 0,05). Os dados são as médias ± desvio padrão. L* (luminosidade), -a*/+a* (verde a vermelho), -b*/+b* (azul para amarelo), ∆E* (diferença total de cor).
Fonte: Autoria própria.

As superfícies dos filmes PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH apresentaram boa homogeneidade visual macroscópica (Figura 9). Contudo, é possível observar defeitos pontuais em ambos os filmes, tais como estrias, provavelmente decorrentes de variações na vazão de ar durante a formação do balão, e pequenos grumos, associados à presença de impurezas ou de componentes insolúveis do material. No entanto, essas ocorrências foram esparsas em relação à área do material. Ambas as formulações resultaram em filmes flexíveis, resistentes à dobradura, facilmente termosseláveis e de fácil manuseio. Diante disso, para a produção dos sachês, foram utilizadas apenas as regiões dos filmes isentas de defeitos visíveis.

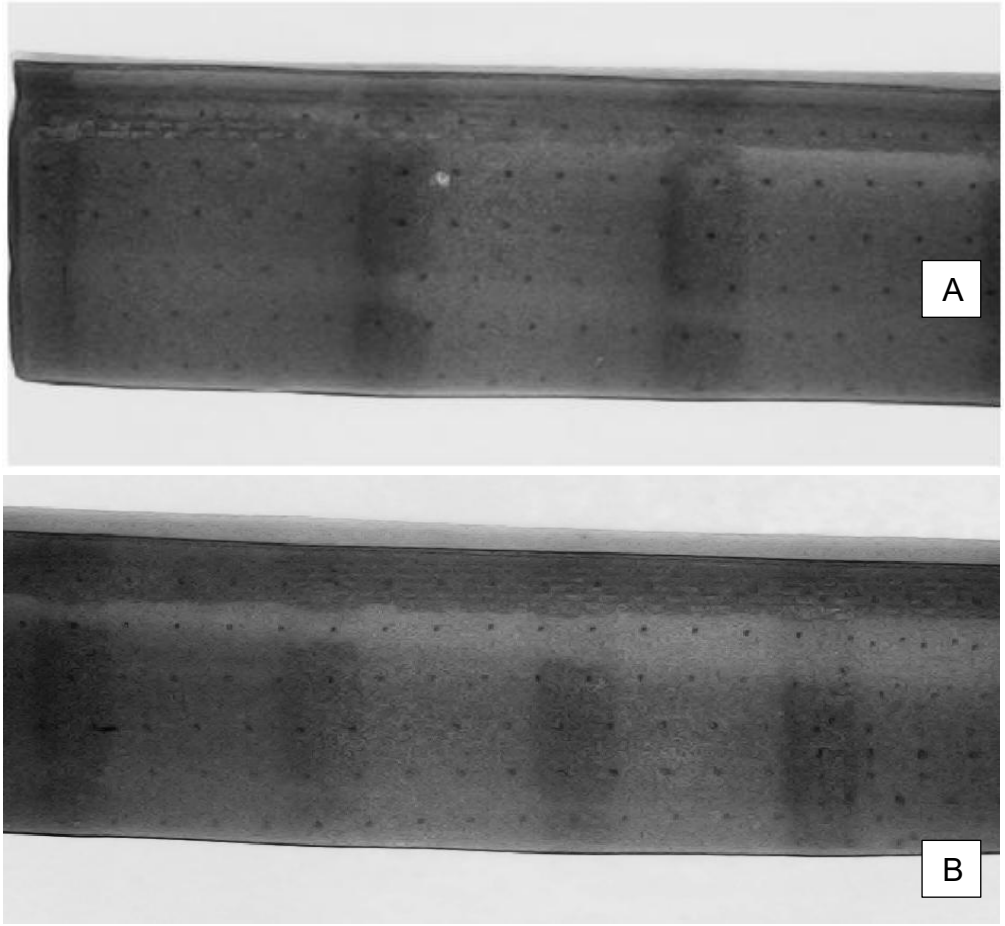
Imagens dos filmes obtidas após a selagem dos sachês e as microperfurações com o rolo de agulhas (Figura 10) evidenciaram a uniformidade no espaçamento entre as fileiras seladas, bem como a regularidade dimensional e a distribuição dos furos.

Figura 9. Capturas obtidas com câmera e *zoom* digital 100x da superfície dos filmes de polímero biodegradável, identificando a presença de defeitos comuns à ambas as formulações (PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH), sendo: grumos insolúveis (imagens A e B) e estrias (imagem C).



Fonte: Autoria própria.

Figura 10. Capturas com câmera e *zoom* digital 10x da superfície dos filmes de ambas as composições, após a termosselagem de três extremidades e a microperfuração com rolo de agulhas (A e B), antes do recorte individual de sachês e acondicionamento das sementes de tomate.



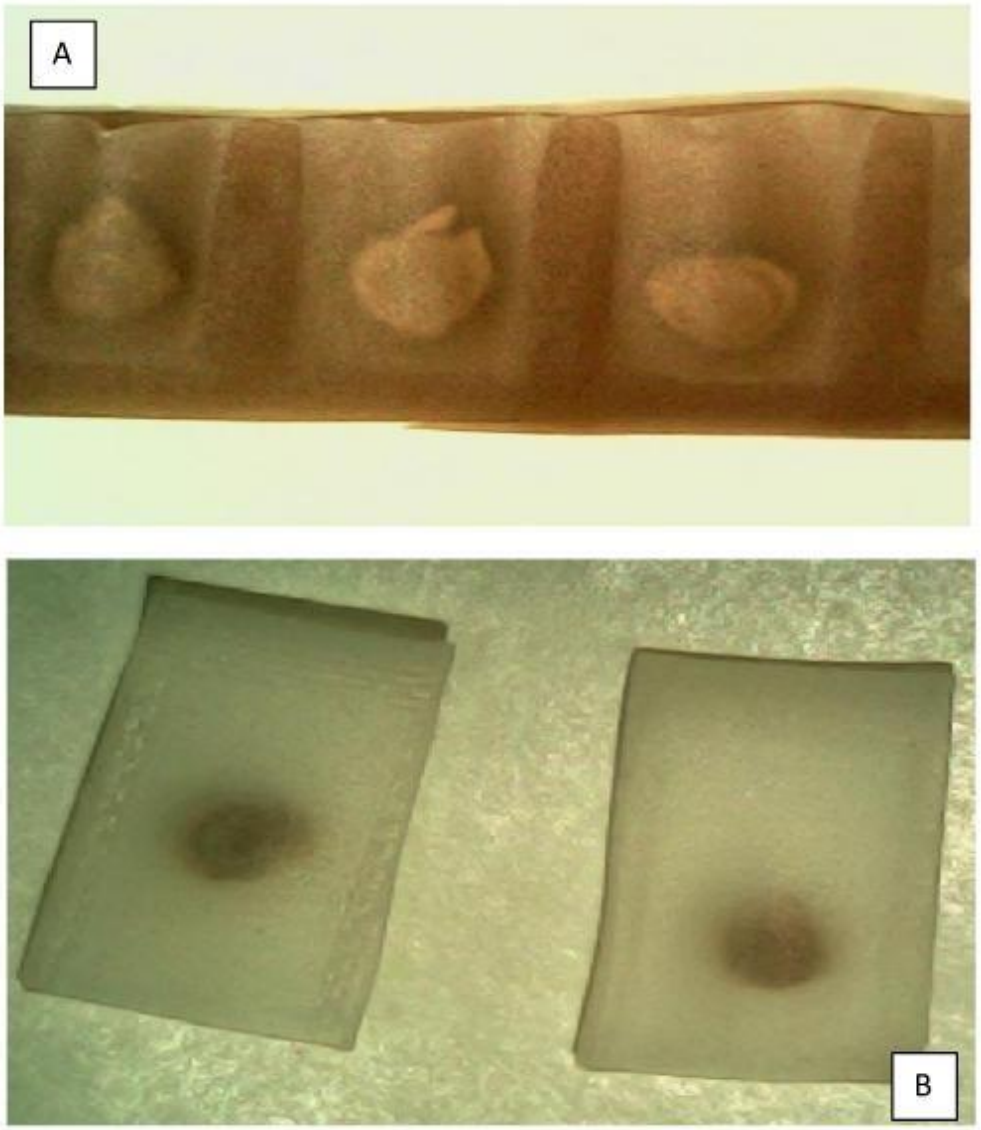
Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 11 ilustra os sachês contendo as sementes de tomate. As sementes sem tratamento apresentaram massa média de 2,5 ± 0,9 mg/semente. Após o acondicionamento nos sachês individuais, a massa média elevou-se para 51,5 ± 13,5 mg/semente, não sendo observada diferença estatisticamente significativa entre os filmes PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH, independentemente da presença de microperfuração ou do tratamento biológico ($p > 0,05$).

Ao considerar a classificação proposta por Javeed *et al.* (2022), verificou-se uma dubiedade estrutural: quanto à forma final da semente, o tratamento é similar a peletização, pois ocorre uma mudança substancial da geometria original da semente; contudo, em relação ao ganho de massa, o tratamento é similar à incrustação, pois o aumento da massa final situa-se entre 10 e 500 vezes o valor original (atingindo

aproximadamente 20 vezes). Portanto, o tratamento proposto não é passível de enquadramento categórico no sistema supracitado.

Figura 11. Capturas com câmera e *zoom* digital 10x das sementes de tomate acondicionadas, antes do recorte de sachês individuais de filme PBAT/ATP-TAH (A) e após recorte dos sachês individuais de filme PBAT/ATP (B).



Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Espessura

A espessura média para o filme PBAT/ATP foi de 0,23 ± 0,04 mm e, para o PBAT/ATP-TAH, de 0,24 ± 0,06 mm. Foi constatado que os dados apresentaram distribuição normal e, pelo teste T de Student, não se observou diferença significativa

entre as médias ao nível de 5% de significância, indicando que a incorporação dos aditivos não influenciou nessa propriedade dimensional.

Comparativamente, a espessura obtida é maior que a dos filmes de farinha de trigo/PBAT desenvolvidos por Balan *et al.* (2020), cujos parâmetros de extrusão por sopro em balão foram similares aos utilizados neste trabalho. Esta diferença pode ser atribuída à substituição da farinha (que contém amido, fibras, proteínas e gorduras) por amido na formulação ou a variações operacionais durante o processo de extrusão, como a vazão de ar no sopro para formação do balão.

5.1.3 Perda de Massa em Água

Os resultados da perda de massa em água (PMA) para os filmes PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH, bem como para os filmes com microperfurações (PBAT/ATP* e PBAT/ATP-TAH*), estão apresentados na Tabela 4. As médias de PMA não diferiram significativamente entre as diferentes formulações; contudo, as microperfurações no filme PBAT/ATP-TAH* elevou significativamente essa propriedade.

A PMA dos filmes PBAT/ATP e PBAT/ATP* foi inferior os resultados obtidos por Balan *et al*. (2021) em metodologia idêntica para matrizes similares (46% de amido, 40% de PBAT e 14% de glicerol), que apresentaram PMA de 4,25 ± 1,59%, apesar do teor mais elevado do componente hidrofóbico (PBAT).

Para os filmes contendo os aditivos (PBAT/ATP-TAH e PBAT/ATP-TAH*), observou-se maior hidrofilicidade do material, com diferença estatisticamente significativa para o sistema perfurado. Para o filme de PBAT/ATP-TAH*, o resultado pode estar associado à maior área superficial exposta e à fragilização causada pelo rolo de agulhas, associado a uma menor esterificação entre o amido e o ácido cítrico, causada pela presença de ácidos húmicos e taninos, uma vez que amidos com menor grau de esterificação apresentam maior afinidade com a água (Garcia *et al.,* 2011).

Tabela 4. Percentual de perda de massa em água (PMA) dos filmes de composição PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH, íntegros, e PBAT/ATP* e PBAT/ATP-TAH*, com microperfurações.

Tratamento	**PMA (%)**
PBAT/ATP	25,12 ± 0,004[b]
PBAT/ATP*	25,63 ± 0,005[b]
PBAT/ATP-TAH	26,12 ± 0,006[b]
PBAT/ATP-TAH*	36,49 ± 0,017[a]

[a,b] médias com letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa (Tukey, p ≥ 0,05). Os dados são as médias ± desvio padrão. PBAT/ATP* e PBAT/ATP-TAH* são os filmes com as micro-perfurações.
Fonte: Autoria própria.

5.1.4 Permeabilidade ao Vapor de Água

No ensaio de permeabilidade ao vapor de água (PVA), a variação de massa das cápsulas cobertas com os filmes biodegradáveis apresentou comportamento linear (R^2 > 0,99) em todas as repetições para ambas as composições. A partir da aplicação desses dados na Equação 1, os valores de PVA calculados para cada repetição, bem como a média por matriz polimérica, constam na Tabela 5. A PVA dos filmes PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH não apresentou diferença significativa entre si (p > 0,05), sugerindo que a adição de ácidos húmicos e taninos à matriz não alterou a permeabilidade dos materiais.

Tabela 5. Resultados de permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH.

Filme	**PVA (x 10^{-7} g.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1})**
PBAT/ATP	4,22 ± 0,36[a]
PBAT/ATP-TAH	4,03 ± 0,13[a]

[a,b] médias com letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa (Tukey, p ≥ 0,05). Os dados são as médias ± desvio padrão.
Fonte: Autoria própria.

Os valores de permeabilidade ao vapor de água encontrados são similares aos obtidos por Balan *et al.* (2020) para filmes de farinha de trigo/PBAT/glicerol (3,65 x 10^{-7} ± 0,01 a 3,74 x 10^{-7} ± 0,56 g.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}), e aos resultados de Da Silva (2018) em

filmes de amido de mandioca/PBAT/glicerol (3,56 x 10^{-7} ± 0,0052 $g.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}$). Essa similaridade de resultados sugere que, em filmes à base de PBAT, a variação da fonte exerce pouca influência sobre as propriedades de barreira ao vapor de água do material.

Considerando que a hidratação das sementes no momento da semeadura está intimamente ligada aos processos fisiológicos de germinação, é importante conhecer a capacidade de permeação de água através do recobrimento aplicado (Niculescu, 2019; Oliveira *et al.,* 2009). Oliveira *et al.* (2009) verificaram a viabilidade do recobrimento de sementes de feijão (via aspersão) com solução formadora de filmes de carboximetilcelulose/alginato de sódio, obtendo valores de PVA próximos aos deste ensaio (entre 1,944 x 10^{-7} a 3,852 x 10^{-7} $g.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}$). Em contrapartida, De Castro e Silva (2019), ao recobrirem sementes de soja (via aspersão) com filmes de pectina/óleo de Neem, e Vercelheze *et al.* (2019), no revestimento de sementes de milho (via aspersão) com filmes de amido/gelatina/poliacetato de vinila, obtiveram efeitos positivos na germinação mesmo utilizando recobrimentos com PVA significativamente maior aos do presente trabalho (até 5,81 x 10^{-3} $g.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}$ e 1,76 x 10^{-6} $g.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}$, respectivamente).

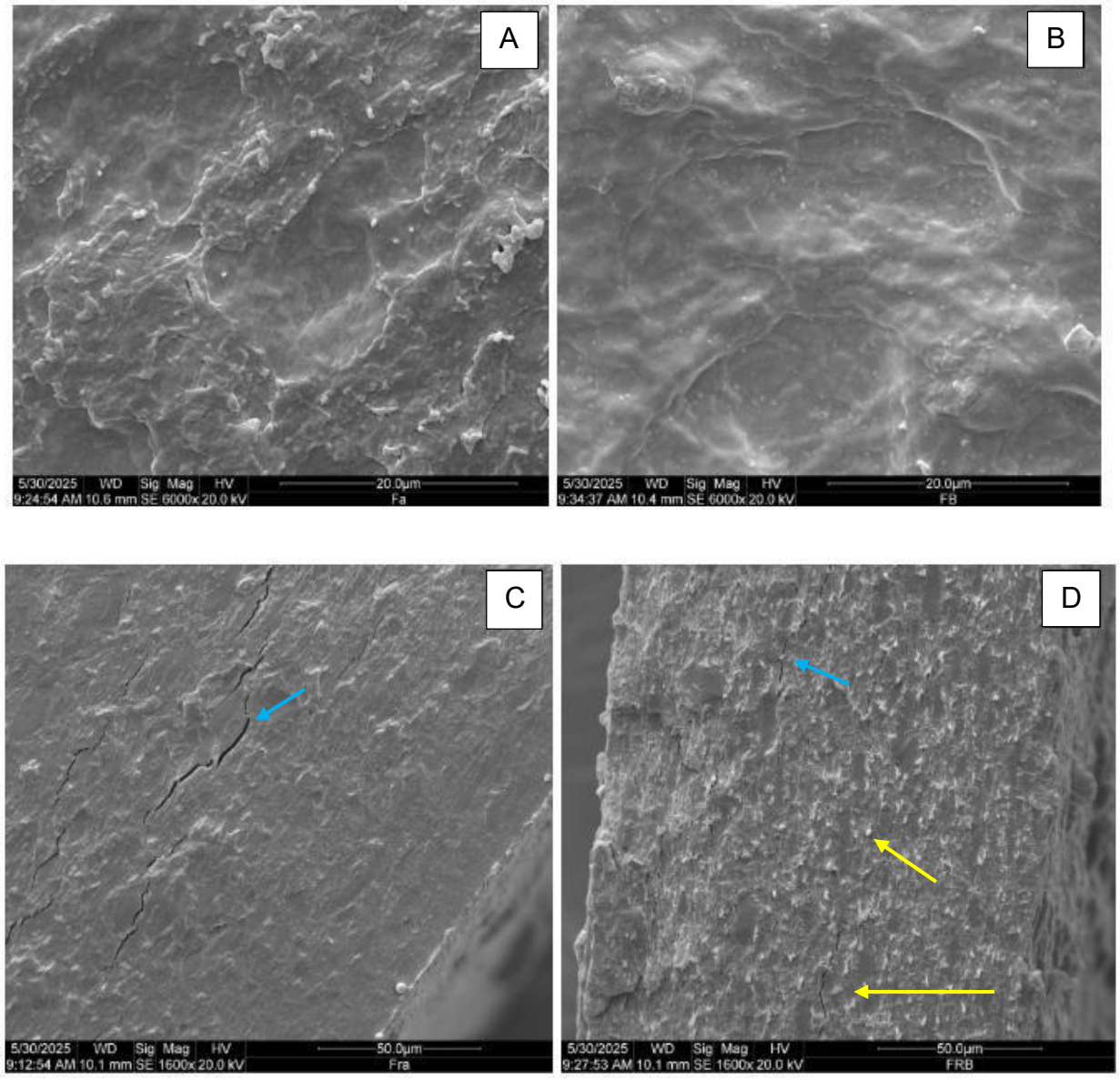
5.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As micrografias eletrônicas das superfícies e fraturas dos filmes biodegradáveis estão apresentadas na Figura 12. No filme PBAT/ATP, a superfície apresentou maior rugosidade, presença de alguns grânulos não gelatinizados, sugerindo que a incorporação de taninos e ácidos húmicos no filme PBAT/ATP-TAH possa ter favorecido a gelatinização do amido (Zanela *et al.,* 2024).

Para ambos os filmes, não foi observada separação de fases, atestando a boa distribuição e dispersão dos componentes no processo de extrusão (Brandelero *et al.,* 2011) e escolha adequada do compatibilizante utilizado, o ácido cítrico (Beluci, 2023; Olivato *et al.,* 2012).

Nas imagens das fraturas, observou-se aspecto de “aspereza”, possivelmente de partículas remanescentes de taninos e de ácidos húmicos (indicadas pelas setas amarelas) no filme de composição PBAT/ATP-TAH. Resultados semelhantes foram obtidos por Da Silva (2019) na incorporação de extrato de água de cozimento do pinhão em blendas de PBAT/ATP com compatibilizante ácido cítrico.

Figura 12. Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície dos filmes PBAT/ATP (A) e PBAT/ATP-TAH (B) (ampliação de 6000x) e das fraturas de PBAT/ATP (C) e PBAT/ATP-TAH (D) (ampliação de 1600x).



* as setas indicam insolubilidades de taninos ou ácidos húmicos (amarelo) e rachaduras (azul).

As rachaduras observadas nas fraturas (indicadas pelas setas azuis) foram comuns à ambas as composições, possivelmente decorrentes da etapa de secagem dos filmes em dessecador, prévia à análise em microscópio eletrônico de varredura.

Ambos os filmes apresentaram estrutura compacta e de baixa porosidade, resultados parecidos com os obtidos por Brandelero *et al.* (2011), que avaliou filmes de PBAT/amido obtidos por método de pré-extrusão do amido termoplástico em comparação com a extrusão conjunta de amido e PBAT. Também estão de acordo com

as constatações de Olivato *et al.* (2012) na produção de filmes PBAT/ATP com ácido cítrico como compatibilizante em metodologia *one pot*, com resultados satisfatórios de compatibilização em composição e técnicas de baixo custo.

5.1.6 Propriedades mecânicas

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos das propriedades mecânicas dos filmes biodegradáveis.

Tabela 6 – Resultados de resistência máxima a tração (RMT), alongamento na ruptura e módulo de Young dos filmes biodegradáveis íntegros, PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH, e microperfurados, PBAT/ATP* e PBAT/ATP-TAH*.

Filme	RMT (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de Young (MPa)
PBAT/ATP	$3,38 \pm 0,36^{a,b}$	$25,68 \pm 2,75^{a}$	$29,59 \pm 4,92^{a}$
PBAT/ATP-TAH	$3,15 \pm 0,21^{b,c}$	$25,28 \pm 1,27^{a}$	$28,13 \pm 1,85^{a}$
PBAT/ATP*	$2,87 \pm 0,25^{c}$	$16,51 \pm 2,27^{b}$	$32,16 \pm 2,55^{a}$
PBAT/ATP-TAH*	$3,59 \pm 0,47^{a}$	$28,32 \pm 7,61^{a}$	$28,57 \pm 3,83^{a}$

^{a,b} médias com letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa (Tukey, $p \geq 0,05$).
Os dados são as médias ± desvio padrão. RMT (resistência máxima a tração).
Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos para os filmes íntegros de PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH são inferiores aos resultados obtidos por Brandelero *et al.* (2012) na análise de filmes de PBAT e amido de mandioca, principalmente quanto à elasticidade. Apesar de serem filmes com composições similares, a origem do amido pode explicar essa diferença: o teor amilopectina no amido de mandioca é superior ao presente no amido de milho, sendo relacionado positivamente a maiores valores de elasticidade e RMT (Zullo; Iannace, 2009).

Com base nos resultados obtidos, observou-se que a microperfuração no filme PBAT/ATP* diminuiu sua resistência mecânica significativamente (de 3,38 MPa para 2,87 MPa), atendendo as expectativas de fragilização da integridade mecânica do filme pelas perfurações realizadas. Por outro lado, na matriz com adição de ácidos húmicos e extrato de taninos, o inverso ocorreu: a introdução das microperfurações não reduziu

a resistência mecânica, havendo inclusive aumento significativo entre PBAT/ATP-TAH e PBAT/ATP-TAH* (de 3,15 MPa para 3,59 MPa).

Observa-se efeito similar da presença de perfurações nos resultados de alongamento na ruptura. Na composição PBAT/ATP, o filme microperfurado (PBAT/ATP*) apresentou capacidade de alongamento estatisticamente inferior ao filme íntegro (redução de 25,68% para 16,51%), evidenciando que as perfurações atuam como pontos de fragilização do material. A realização de microperfurações no filme PBAT/ATP-TAH* elevou a capacidade de deformação para o resultado mais alto observado (28,32%), sem diferença estatística dos filmes íntegros (25,28%).

Quanto aos valores médios do Módulo de Young, a ausência de diferença significativa entre os filmes indica que tanto a microperfuração quanto as alterações na composição não influenciaram a rigidez primária da blenda.

A análise de variância fatorial 2^2 (Tabela 7) confirmou que a interação entre os fatores Composição do Filme (F) e Perfurações (P) tem efeito significativo sobre os resultados de RMT e alongamento na ruptura. Esses resultados reforçam que a presença de microperfurações afeta de maneira distinta as propriedades mecânicas dos filmes, dependendo de sua composição.

A análise também indicou que o fator Composição do filme (F) tem efeito significativo sobre o alongamento na ruptura e a RMT. Esses resultados podem ser atribuídos à ação dos ácidos húmicos e taninos como plasticizantes secundários. O fator Perfurações (P) também apresentou influência significativa sobre o alongamento na ruptura, embora de forma mais sutil ($p = 0,0286$) em comparação ao efeito da composição ($p = 0,0001$). Corroborando os resultados obtidos no teste de Tukey, observou-se que, na ausência de aditivos, o impacto das perfurações como defeitos estruturais é drasticamente maior.

Para o Módulo de Young, a ANOVA apontou efeito significativo do fator F ao considerar os dados agrupados conforme a composição de cada filme, sem distinção entre íntegro e perfurado. Filmes com aditivos tornaram a matriz polimérica levemente menos rígida (média entre PBAT/ATP-TAH e PBAT/ATP-TAH* de 28,35 MPa) em comparação aos filmes sem TAH (média entre PBAT/ATP e PBAT/ATP* de 30,88 MPa). Entretanto, o efeito de F não foi suficiente para implicar em diferenças estatisticamente significativas nos resultados de alongamento na ruptura e Módulo de Young entre os filmes íntegros de diferentes composições, segundo o teste de comparações múltiplas

de Tukey. Esse comportamento pode ser justificado pela pequena variação na composição mássica entre os filmes avaliados.

Tabela 7. Análise de variância das propriedades mecânicas dos filmes de PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH, quanto aos fatores Composição do Filme (F) e presença de Perfurações (P) e sua interação.

Fator	GL	RMT (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de Young (MPa)
Composição do Filme (F)	1	0,0293*	0,0001*	0,0284*
Perfurações (P)	1	0,7416	0,0286*	0,1824
Interação (F x P)	1	0,00007*	0,00006*	0,3424
Resíduo	36	-	-	-

* Valores significativos a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). GL (graus de liberdade) e RMT (resistência máxima à tração).

Fonte: Autoria própria.

Chen *et al.* (2025), ao avaliarem as propriedades mecânicas de filmes de PBAT/ATP com adição de óleo essencial de canela e produzidos por extrusão por sopro, observaram que a presença de grânulos de amido torna os filmes mais susceptíveis à fratura sob tensão, enquanto a presença de furos contribui para o enfraquecimento das suas propriedades mecânicas. De forma semelhante, Zhai *et al.* (2024) relataram que a fase dispersa de ATP na matriz contínua de PBAT pode comprometer a integridade estrutural dos filmes devido à redução do grau de emaranhamento das cadeias poliméricas.

Conforme evidenciado pelas micrografias obtidas por MEV (Figura 12), o filme PBAT/ATP apresentou maior quantidade de grânulos de amido insolúveis quando comparado ao filme PBAT/ATP-TAH. Dessa forma, a associação entre a estrutura heterogênea e a presença de microperfurações no filme PBAT/ATP* favorece a concentração de tensões e a propagação de fissuras, resultando na redução da RMT e do alongamento na ruptura.

Em contrapartida, a incorporação de taninos vegetais e ácidos húmicos pode ter contribuído para modificar a organização da matriz polimérica, atuando como plasticizantes secundários. Esse efeito possivelmente favoreceu uma redistribuição

mais homogênea das tensões mecânicas, dificultando a propagação de fissuras a partir das microperfurações e, consequentemente, mitigando o impacto desses defeitos sobre as propriedades mecânicas dos filmes. Ainda, Chen *et al.* (2021), ao estudar hidrogéis com adição de taninos, verificaram que este aditivo cria ligações não-covalentes fortes e reversíveis, como ligações de hidrogênio, chamadas de “ligações sacrificiais”, que são capazes de dissipar energia do tracionamento do material ao redor de defeitos, num fenômeno chamado de insensibilidade ao entalhe (*notch insensitivity*).

5.2 AVALIAÇÃO DA EMERGÊNCIA DAS SEMENTES DE TOMATE

Os resultados da porcentagem de plântulas emergidas (E), índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo médio de emergência (TME) de sementes de tomate, avaliadas em substrato comercial para semeadura, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Médias de Percentual de Emergência (E), Índice de Velocidade de Emergência (IVE) e Tempo Médio de Emergência (TME) das plântulas de tomate resultantes da semeadura dos tratamentos do Quadro 1 em casa de vegetação.

Trat.	F	B	P	E (%)	IVE	TME (dias)
T1	Não (Controle -)	Não	Não	82,29 ± 2,08^{a}	2,94 ± 0,27^{a,b}	7,17 ± 0,42^{d}
T2	Não (Controle +)	Sim	Não	83,33 ± 9,00^{a}	2,59 ± 0,37^{a}	7,75 ± 0,37^{c,d}
T3	PBAT/ATP	Não	Não	39,58 ± 16,14^{d}	1,23 ± 0,40^{c}	9,10 ± 0,85^{b,c}
T4	PBAT/ATP-TAH	Não	Não	65,62 ± 19,65^{b}	1,77 ± 0,52^{a,b,c}	9,75 ± 0,24 ^{a,b}
T5	PBAT/ATP	Sim	Não	58,33 ± 10,2d1^{b,c}	1,47 ± 0,25^{b,c}	9,28 ± 0,98^{b,c}
T6	PBAT/ATP-TAH	Sim	Não	61,46 ± 14,18^{b}	1,44 ± 0,28^{b,c}	10,35 ± 0,51^{a}
T7	PBAT/ATP	Não	Sim	43,75 ± 9,92^{c}	1,17 ± 0,13^{c}	8,75 ± 0,50^{c}
T8	PBAT/ATP-TAH	Não	Sim	46,87 ± 23,91^{c}	1,35 ± 0,50^{c}	10,70 ± 0,99^{a}
T9	PBAT/ATP	Sim	Sim	41,66 ± 22,71^{c}	1,01 ± 0,60^{c}	10,13 ± 0,91^{a}
T10	PBAT/ATP-TAH	Sim	Sim	62,49 ± 15,59^{b}	1,55 ± 0,40^{c}	10,00 ± 0,24 ^{a,b}

[a,b] médias com letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa (Tukey, p ≥ 0,05). Os dados são as médias ± desvio padrão. Fatores considerados: F (composição do filme); B (inoculação com *Trichoderma harzianum)*; P (perfuração com rolo de agulhas).
Fonte: Autoria própria.

A porcentagem de plântulas emergidas (E) das sementes nuas (T1 e T2) foi significativamente superior à de todos os tratamentos em que as sementes foram acondicionadas em sachês, sugerindo um efeito prejudicial do acondicionamento sobre a emergência de plântulas. Contudo, entre os grupos que utilizaram filmes biodegradáveis, observou-se que os tratamentos T4 (PBAT/ATP-TAH) e T10 (PBAT/ATP-TAH + *T. harzianum* + microperfurações) apresentaram os melhores desempenhos, superando significativamente o T3 (PBAT/ATP), que obteve a menor média (39,58%). Estes resultados indicam que a composição da blenda influencia a emergência e que a adição de ácidos húmicos e taninos (TAH) mitigou o estresse causado pelo acondicionamento nos sachês.

Quanto ao índice de velocidade de emergência (IVE), as sementes nuas (T1 e T2) apresentaram, novamente, os maiores resultados (2,94 e 2,59). Dentre as sementes mantidas em sachês, o tratamento T4 destacou-se como a combinação de fatores mais promissora quanto à IVE (1,77), sendo o único que não diferiu estatisticamente dos resultados das sementes nuas (T1 e T2). De modo geral, os tratamentos T3 a T10 apresentaram um comportamento padronizado: o acondicionamento das sementes em sachês reduziu o índice de velocidade de emergência em comparação a semente nua em todos os casos. Porém, a adição de taninos e ácidos húmicos à blenda (PBAT/ATP-TAH) e o tratamento biológico com *T. harzianum* favoreceram a elevação do IVE, como evidenciado por T4.

Em relação ao tempo médio de emergência (TME), as sementes nuas apresentaram os melhores resultados, ou seja, menores tempos médios (média de 7 dias). Entre as sementes acondicionadas em sachês, o tratamento T7 (PBAT/ATP*) foi o que mais se aproximou das sementes nuas, não diferindo significativamente de T2. Entretanto, este resultado não deve ser avaliado isoladamente, pois poderia levar a uma interpretação erroneamente positiva, já que a porcentagem de plântulas emergidas em T7 foi consideravelmente inferior à das sementes nuas.

Os tratamentos T1 e T2 (sementes de tomate sem tratamento e com tratamento biológico, respectivamente) não apresentaram diferenças significativas entre si para

nenhuma das variáveis avaliadas (E, IVE e TME). Esses resultados indicam que a aplicação do produto comercial *Trichoderma harzianum* não influenciou na emergência das sementes nuas, mas exerceu um papel fundamental quando associada aos filmes biodegradáveis, o que pode ser explicado pela sua capacidade de degradação do PBAT (Jiang *et al.,* 2026; Rusiecka *et al.*, 2026) e atuação em situações de estresse (Mastouri *et al.,* 2021).

O acondicionamento das sementes em sachês impôs, de forma consistente, uma barreira ao desenvolvimento das sementes e emergência das plântulas. Apesar de, em alguns casos, a análise estatística não indicar diferença significativa, esses tratamentos apresentaram tendências de resultados inferiores quando comparados às sementes sem acondicionamento. A blenda PBAT/ATP-TAH (T4 – sem tratamento e microperfurações) e a combinação PBAT/ATP-TAH com microperfurações e tratamento biológico (T10) mostraram-se as alternativas mais promissoras entre os tratamentos avaliados com sachê.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para o bloco fatorial (T3 a T10) são apresentados na Tabela 9. A composição dos filmes foi a única fonte de variação significativa (p= 0,0398) para o percentual de plântulas emergidas (E), indicando que a adição de ácidos húmicos e de taninos tem impacto significativo no desempenho das sementes acondicionadas em sachês.

Quando ao IVE, nenhum dos fatores principais apresentou efeito significativo isolado, tampouco suas interações, corroborando a “nivelação” observada entre os tratamentos T3 a T10, que não diferiram estatisticamente entre si nos resultados de IVE. Entretanto, destaca-se que a interação tripla P x B x F atingiu o limiar do valor de p considerado na análise (p= 0,0519), portanto, mesmo que não seja considerado estatisticamente significativo pela ANOVA, tal valor sugere que a interação entre *T. harzianum*, microperfurações e composição podem ter influenciado as respostas de E, IVE e TME de forma mais sutil.

A composição do filme (F) (p= 0,0018) e a interação tripla entre composição dos filmes (F), o tratamento biológico (B) e as microperfurações (P) (p= 0,0201) tiveram efeito significativo para TME, evidenciando que os fatores atuam de maneira integrada, mas fortemente dependente da composição do filme.

Tabela 9. Análise de variância para porcentagem de plântulas emergidas (E), índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo médio de emergência (TME) de sementes de tomate em substrato comercial (tratamentos T3 a T10).

Fator	GL	E (%)	IVE	TME (dias)
Composição (F)	1	1411,00*	0,45840	6,753*
Biológico (B)	1	395,44	0,09570	1,02
Perfurações (P)	1	456,4	0,38940	0,63
P x B	1	13,53	0	1,58
P x F	1	13,56	0,01	0,03
B x F	1	0,55	0	0,01
P x B x F	1	824,89	0,90788	3,445*
Resíduo	24	303,41	0,22	0,52

* Valores significativos a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). GL (graus de liberdade).

Fonte: Autoria própria.

A avaliação dos contrastes ortogonais é apresentada na Tabela 10. Considerou-se o valor de F tabelado de 4,96 (para $\alpha = 5\%$). Esta análise confirma as constatações previamente realizadas, de que o acondicionamento em sachê (avaliado pelo contraste C1) impacta significativamente os valores de E ($F_{calc} = 19,64$) e, de forma mais severa, a IVE ($F_{calc} = 66,77$) e o TME ($F_{calc} = 74,24$), independentemente da composição dos filmes. Portanto, tem-se que o acondicionamento das sementes em sachês afeta negativamente essas três variáveis.

Observou-se também que não houve influência estatisticamente significativa do tratamento biológico com *Trichoderma harzianum* (T2) nas sementes nuas em comparação as sementes nuas sem tratamento (T1), por meio do contraste C2. É possível que não tenha sido observado efeito de promoção de crescimento vegetal pronunciado devido à ausência de estresses nestes tratamentos, conforme Mastouri *et al*. (2021), que avaliou também a aplicação de *Trichoderma harzianum* T22 em tratamento de sementes de tomate.

Quanto ao contraste C3, este demonstra que a composição dos filmes impacta significativamente os resultados de E e de TME, evidenciando uma correlação positiva

ao uso de blenda PBAT/ATP-TAH na produção do sachê. Assim como observado nas análises anteriores, corrobora que a incorporação dos aditivos ácidos húmicos e taninos à matriz polimérica diminui o efeito negativo do acondicionamento sobre as sementes de tomate.

Por fim, o contraste C4 traz informação de que, avaliando-se o efeito global das perfurações nos sachês, a presença destas não tem impacto estatisticamente significativo sobre as respostas. Em outras palavras, isoladas do fator composição e tratamento biológico, as perfurações não são suficientes para impactar as respostas de E, IVE ou TME.

Tabela 10. Análise de contrastes para porcentagem plântulas emergidas (E), índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo médio de emergência (TME) de sementes de tomate em substrato comercial (tratamentos T1 a T10).

Parâmetro	**Contraste**	**F_{calc}**
E (%)	C1	19,64*
	C2	0,27
	C3	5,60*
	C4	1,73
IVE	C1	66,77*
	C2	0
	C3	2,27
	C4	1,93
TME (dias)	C1	74,24*
	C2	1,46
	C3	14,36*
	C4	1,22

* Valores significativos a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Fcalc (valor de F calculado). Os contrastes se referem a: C1 - comparação entre sementes nuas (T1, T2) e em sachê (T3 a T10), C2 – comparação entre T1 e T2, C3 – comparação entre composições dos sachês (T3 a T10), C4 – comparação entre sachês de filmes perfurados e não-perfurados, independente da composição.
Fonte: Autoria própria.

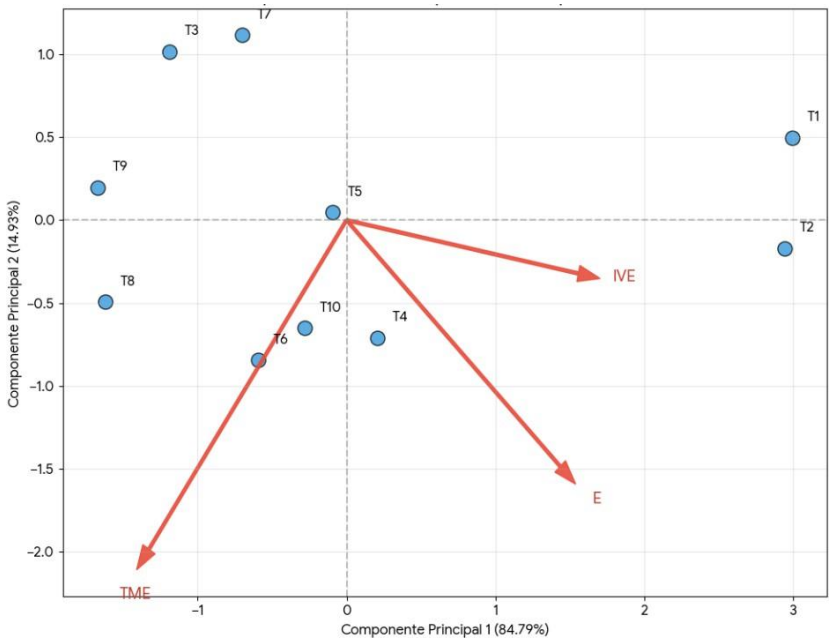
Ao submeter os resultados de todos os tratamentos à Análise de Componentes Principais (ACP) (Figura 13), verificou-se que os dois primeiros componentes (CP1 e

CP2) retêm 99,72% da variância total dos dados. Desta forma, torna-se possível desconsiderar o efeito dos demais componentes.

O primeiro componente principal (CP1) explica 84,79% da variância e pode ser interpretado como um índice de “qualidade geral” dos tratamentos: valores elevados de CP1 estão associados a maiores porcentagens de plântulas emergidas (E), maiores índices de velocidades de emergência (IVE) e menores tempos médio de emergência (TME). Por sua vez, o segundo componente principal (CP2) representa 14,93% da variância e reflete o comportamento específico do tempo e a estabilidade da emergência. Valores positivos de CP2 estão associados a baixos valores de TME e de E; ou seja, caracteriza tratamentos com baixa capacidade de emergência das plântulas, mas que alcançaram emergência máxima em um curto intervalo de tempo.

A Análise de Componentes Principais (ACP) permite a visualização espacial do comportamento dos tratamentos, corroborando os resultados obtidos da análise de variância. Observa-se clara separação entre os tratamentos com sementes nuas (T1 e T2) dos tratamentos com sementes acondicionadas em sachês (T3 a T10). O isolamento dos tratamentos de sementes nuas corrobora as constatações anteriores sobre o acondicionamento das sementes em sachês, que é fator crucial e negativamente correlacionado com a emergência da plântula.

Figura 13. Gráfico biplot da Análise de componentes principais (ACP) (CP1 e CP2) em relação às variáveis respostas (E, IVE e TME) dos tratamentos das sementes de tomate.



Fonte: Autoria própria.

Dentre os tratamentos de sementes acondicionadas em sachê (T3 a T10), verifica-se proximidade entre os tratamentos que utilizaram a blenda com composição PBAT/ATP-TAH (T4, T6, T8 e T10) e entre os tratamentos de blenda com composição PBAT/ATP (T3, T5, T7 e T9). Principalmente T4, T10 e T6 apresentam-se mais próximos, sendo os melhores resultados dentre as sementes acondicionadas em sachê.

Após o ensaio, as plântulas foram removidas do substrato e lavadas (Figura 14). Constatou-se que, independentemente da composição do filme, o sachê permaneceu presente, retendo parcialmente seu formato e com baixa degradação evidente após o período avaliado (15 dias).

Conforme esperado pelos resultados de avaliação de emergência, observou-se baixo grau de uniformidade de desenvolvimento entre as plântulas de todos os tratamentos de T3 a T10, com variações drásticas de desenvolvimento de raiz e de parte aérea. Também foi possível observar maior número de plântulas anormais dentre os tratamentos com acondicionamento da semente em sachê (indicado pelas setas vermelhas).

Em contrapartida, as plântulas originadas dos tratamentos controle, ou seja, sem acondicionamento da semente de tomate em sachê (T1 e T2), apresentaram elevada uniformidade de desenvolvimento, além de, em geral, apresentarem desenvolvimento em estádio mais avançado.

Qin *et al.* (2026) constataram que, em condições de estresse nutricional e hídrico, sementes de tomate que receberam aplicação de ácidos húmicos, na forma líquida ou sólida, desenvolveram maior biomassa de parte aérea e tiveram melhor rendimento de produção, reforçando a ação bioestimulante dos aditivos em condições não-ideais. Em concordância, os resultados obtidos dos ensaios de emergência confirmam a atuação dos ácidos húmicos e taninos vegetais como agentes bioestimulantes mesmo enquanto componentes de blenda polimérica.

Segundo Mastouri *et al.* (2021), os efeitos da aplicação de *Trichoderma harzianum* no tratamento de sementes de tomate são mais pronunciados quando o desenvolvimento das plantas é avaliado sob condições de estresse, o que explica a ausência de diferença significativa entre os resultados de T1 e T2. Entretanto, para os demais tratamentos, em condições de estresse, o tratamento com *T. harzianum* não foi

suficientemente impactante para promover resultados diferentes de emergência de plântulas quando avaliado isoladamente, apenas apresentando impacto significativo quando associado ao filme perfurado com composição PBAT/ATP-TAH. Este resultado também sugere que a afinidade do *T. harzianum* pelo PBAT/ATP e ácidos húmicos foi mais expressiva que a ação antimicrobiana dos taninos vegetais.

Figura 14. Exemplares de plântulas obtidas de sementes de tomate acondicionadas em sachês de composição PBAT/ATP-TAH (A), PBAT/ATP (B) e sem acondicionamento em sachê (C), após 15 dias de ensaio de emergência em casa de vegetação.



Fonte: Autoria própria.

De modo similar, a realização das microperfurações no filme não teve impacto

significativo sobre as respostas de emergência de plântulas, exceto quando realizadas no filme PBAT/ATP-TAH e associada à presença de *T. harzianum,* possivelmente devido ao aumento da área superficial disponível para ataque e degradação pelo agente biológico (Alcaraz-Dólera *et al.,* 2026).

A influência desfavorável do acondicionamento das sementes nos sachês de polímero biodegradável sobre o desenvolvimento inicial das plantas é evidenciada em todas as análises realizadas, bem como nas imagens das plântulas recuperadas. O estudo de Emparang *et al.* (2026) encontrou resultados similares na peletização de sementes de repolho chinês com diferentes materiais, onde o prolongamento do tempo de desintegração do *pellet* esteve associado com redução de germinação, atraso de emergência das plântulas e baixo vigor das sementes.

O recobrimento da semente pode restringir a embebição da semente, bem como a disponibilidade de oxigênio, principalmente em solos saturados de água (Emparang *et al.,* 2026; Phillips *et al.,* 2026). Phillips *et al.* (2026) ressalta que a estrutura do solo, a disponibilidade de água e o recobrimento da semente interagem para determinar o sucesso da germinação, destacando a importância da avaliação dos resultados em condições de campo.

Portanto, é possível que os resultados de emergência decorrentes do uso dos sachês de polímero biodegradável, inferiores aos resultados das sementes nuas, sejam devido à ação constritiva do sachê sobre o início da germinação, visto que a estrutura do sachê permaneceu basicamente inalterada no período avaliado. O desenvolvimento inicial adequado das plantas pode ter sido prejudicado por mecanismos como restrição física da embebição das sementes e/ou da disponibilidade de oxigênio (Gorim; Asch, 2017; Phillips *et al.,* 2026).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Os filmes desenvolvidos à base de PBAT/ATP e PBAT/ATP-TAH apresentaram-se uniformes, com poucos defeitos, sendo o ácido cítrico e o glicerol, respectivamente, eficazes compatibilizante e plastificante das blendas. A incorporação de ácidos húmicos e taninos vegetais não prejudicou a processabilidade do material, sem promover alteração significativa da espessura média, permeabilidade ao vapor de água e perda de massa em água entre as diferentes composições do filme íntegro.

A técnica utilizada para selagem e microperfuração dos filmes foi eficaz e uniforme. De forma inesperada, os filmes microperfurados comportaram-se de forma distinta conforme sua composição, com correlação positiva da associação das microperfurações com filmes PBAT/ATP-TAH na perda de massa em água e resistência máxima a tração do material, e correlação negativa das microperfurações em PBAT/ATP com a resistência máxima a tração e o alongamento na ruptura.

Os resultados indicam que os sachês de filmes produzidos com PBAT, amido, glicerol e ácido cítrico nas proporções exploradas não são adequados para uso no acondicionamento e semeadura de sementes de tomate. Mesmo o impacto positivo dos ácidos húmicos, taninos e *Trichoderma harzianum* sobre o desenvolvimento inicial da planta e a maior solubilidade promovida pela presença das microperfurações associadas à composição PBAT/ATP-TAH não foram capazes de equiparar os resultados das sementes acondicionadas em sachês aos resultados das sementes nuas dos tratamentos controle.

6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Os filmes à base de PBAT/ATP apresentam oportunidades de pesquisa na exploração do uso como cobertura de solo (*mulching*), com destaque para a formulação PBAT/ATP-TAH, cujas avaliações sugerem ação bioestimulante.

Para utilização em acondicionamento de sementes, sugere-se o desenvolvimento e avaliação de outras composições de blendas poliméricas, prezando-se que a velocidade de biodegradação do polímero apresente maior sincronismo com o ciclo biológico do desenvolvimento inicial da cultura. Adicionalmente, recomenda-se a realização de ensaios em condições de campo para avaliar as diferenças na emergência entre tratamentos em ambiente não controlado.

Também é interessante a avaliação da utilização de ácidos húmicos e taninos isoladamente, pois, apesar de ambos serem bioestimulantes, a capacidade antimicrobiana dos taninos pode atrasar a degradação do material pelos microrganismos do solo.

Por fim, a avaliação da aplicação dos polímeros acondicionando sementes na forma de tapetes ou fitas pode ser explorada, visto que é uma técnica mais conhecida de acondicionamento de sementes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L.M.; PFENNING, L.H. O gênero *Trichoderma*. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; DA SILVA, J. C. ***Trichoderma*: uso na agricultura**. Brasília (DF): Embrapa, p. 163-179, 2019.

ADAMCZYK, S.; ZANTIS, L.J.; VAN LOON, S.; VAN GESTEL, S.A.M.; BOSKER, T.; HURLEY, R.; NIZZETTO, L.; ADAMCZYK, B.; VELMALA, S. Biodegradable microplastics induce profound changes in lettuce (*Lactuca sativa*) defense mechanisms and to some extent deteriorate growth traits. **Environmental Pollution**, v. 363, 2024.

ALCARAZ-DÓLERA, M.; ROS, M.; PENALVER, R.; PASCUAL, J. A. Bioplastics in agricultural soils: Biodegradability, analytical techniques, and soil microbial impact. **Journal of Hazardous Materials**, v. 507, 2026.

AMORIM, R. INSA/MCTI realiza pesquisas com a utilização de microrganismos benéficos em sementes. **Instituto Nacional do Semiárido - INSA**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/assuntos/noticias/insa-mcti-realiza-pesquisas-com-a-utilizacao-de-microrganismos-beneficos-em-sementes>. Acesso em 29/06/2024.

ARVANITOYANNIS, I.; BILIADERIS, C.G.; OGAWA, H.; KAWASAKI, N. Biodegradable films made from low-density polyethylene (LDPE), rice starch and potato starch for food packaging applications: Part 1. **Carbohydrate Polymers**, v. 36 (2-3), p. 89-104, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15448-2**: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis. Parte 2: biodegradação e compostagem. Rio de Janeiro, 2008.

ASTM. Standard Terminology Relating to Plastics (D883-17). **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, 2017.

ASTM. Standard test methods for water vapor transmission of material (E96-00). **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, 2000.

BALAN, G.C.; YAMASHITA, F.; SAKANAKA, L.S.; SHIRAI, M.A. Elaboração e caracterização de filmes extrusados a partir de blendas de poli(adipato-co-tereftalato de butileno) e farinha de trigo com diferente *Falling number*. **Brazilian Journal of Development**, v. 6 (6), p. 41426-41438, 2020.

BALAN, G.C.; PAULO, A.F.S.; CORREA, L.G.; ALVIM, I.D.; UENO, C.T.; COELHO, A.R.; STRÖHER, G.R.; YAMASHITA, F.; SAKANAKA, L.S.; SHIRAI, M.A. Production of Wheat Flour/PBAT Active Films Incorporated with Oregano Oil Microparticles and Its Application in Fresh Pastry Conservation. **Food and Bioprocess Technology**, v. 14, p. 1587-1599, 2021.

BANDOPADHYAY, S.; MARTIN-CLOSAS, L.; PELACHO, A.M.; DEBRUYIN, J.M. Biodegradable Plastic Mulch Films: Impacts on Soil Microbial Communities and Ecosystem Functions. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, 2018.

BETTIOL, W.; LUCON, C. M. M.; PINTO, Z. V. Controle de qualidade de produtos biológicos à base de *Trichoderma*. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; DA SILVA, J. C. ***Trichoderma*: uso na agricultura**. Brasília (DF): Embrapa, p. 275-295, 2019.

BELUCI, N.C.L. Desenvolvimento de Materiais Biodegradáveis à Base de Amido Termoplástico, Poli (Succinato de Butileno) e Poli (Adipato Cotereftalato de Butileno). 2023. 97 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciência de Alimentos). Londrina (PR): **Universidade Estadual de Londrina**, 2023.

BILCK, A. P. et al. Using glycerol produced from biodiesel as a plasticiser in extruded biodegradable films. **Polimeros**, v. 25, n. 4, p. 331–335, 2015.

BILCK, A. P.; YAMASHITA, F.; MARZANO-BARREDA, L. A. Characterization and application of starch/polyester packaging produced by blown extrusion. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, p. 100088, 2021.

BRASIL. Regras para análise de sementes. **Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Brasília: Mapa/ACS, 2009.

BRASIL. Senado Federal. Projeto de Lei 2524/2022. Estabelece regras relativas à economia circular do plástico; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, altera a Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. **Congresso Nacional**, Brasília, 2022. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/154790>. Acesso em 10/11/2024.

BRANDELERO, R.P.H.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F. Effect of the method of production of the blends on mechanical and structural properties of biodegradable starch films produced by blown extrusion. **Carbohydrate polymers**, v. 86, p. 1344 – 1350, 2011.

BRESSANIN, H.R.C. **Bioplásticos a partir de amidos**. São Paulo: FEMA, 2010.

CANELLAS, L. P.; BALMOLRI, D. M.; MÉDICI, L. O.; AGUIAR, N. O.; AMPOSTRINI, E.; ROSA, R. C. C.; FAÇANHA, A. R.; OLIVARES, F. L. A combination of humic substances and *Herbaspirillum seropedicae* inoculation enhances the growth of maize (*Zea mays L.*). **Plant and Soil**, v. 366, p. 119-132, 2013.

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; SANTOS, G.A. Dois: Modelos estruturais de substâncias húmicas. In: CANELLAS, L.P. e SANTOS, G.A. **Humosfera: Tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas.** Campo dos Goytacazes: UENF, p. 34-53, 2005.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012.

CASTRO E SILVA, P. Desenvolvimento de nanobiocompósitos antifúngicos poliméricos para revestimento de sementes. Tese (Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais). Lavras: **Universidade Federal de Lavras**, 2019.

CHANDRIKA, K.S.V.P.; PRASAD, R.D.; PRASANNA, S.L.; SHREY, B.; KAVYA, M. Impact of biopolymer-based *Trichoderma harzianum* seed coating on disease incidence and yield in oilseed crops. **Helyon**, v. 10, 2024.

CHANG, J.M.; JOYE, I.J. Improving agricultural sustainability – A review of strategies to valorize tomato plant residues (TPR). **Waste Management**, v. 180, p. 88-101, 2024.

CHAPLYGIN, M.E.; TSENCH, Y.S.; PODZOROV, A.V. Development of Seeder Design and Technologies of Seed Tape Planting. **Agricultural Machinery and Technologies**, v. 19 (1), p. 103-110, 2025.

CHEN, C.; HE, L.; TIAN, Y.; XIE, J. Improving the preparation process to enhance the retention of cinnamon essential oil in thermoplastic starch/PBAT active film and its antimicrobial activity. **Industrial Crops & Products**, v. 230, 2025.

CHEN, K.; LIN, Q.; WANG, L.; ZHUANG, Z.; ZHANG, Y.; HUANG, D.; WANG, H. An All-in-One Tannic Acid-Containing Hydrogel Adhesive with High Toughness, Notch Insensitivity, Self-Healability, Tailorable Topography, and Strong, Instant, and On-Demand Underwater Adhesion. **ACS Appl. Mater. Interfaces**, 13, 9748−9761, 2021.

CHINAGLIA, S.; TOSIN, M.; DEGLI-INNOCENTI, F. Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level. **Polymer Degradation and Stability**, v. 147, p. 237-244, 2018.

CHIPENETE, G. H. N. Manejos para produção e armazenamento de sementes de tomate. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Lavras: **Universidade Federal de Lavras**, 2023.

CLARIANT PLASTICS & COATINGS LTD. Colorants for Seed Treatment and Fertilizers AGROCER™. Suíça: **Clariant Plastics & Coatings Ltd**., 2016.

DALACOSTA, N. L.; FURLAN, S. H.; MAZARO, S. M. Compatibilidade de produtos à base de *Trichoderma* com fungicidas utilizados no tratamento de sementes. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; DA SILVA, J. C. ***Trichoderma*: uso na agricultura**. Brasília (DF): Embrapa, p. 323-338, 2019.

DA ROSA, S.D.V.F.; MCDONALD, M.B.; VEIGA, A.D.; VILELA, F.; FERREIRA, I.A. Staging coffee seedling growth: a rationale for shortening the coffee seed germination test. **Seed Science & Technology**, v. 38, p. 421-431, 2010.

DA SILVA, M.S.R.A.; TAVARES, O.C.H.; RIBEIRO, T.G.; DA SILVA, C.S.R.A.; DA SILVA, C.S.R.A.; GARCÍA-MINA, J.M.; BALDANI, V.L.D.; GARCÍA, A.C.; BERBARA, R.L.L.; JESUS, E.C. Humic acids enrich the plant microbiota with bacterial candidates for the suppression of pathogens. **Applied Soil Ecology**, v. 168, 2021.

DA SILVA, N.M.C. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis utilizando amido produzidos por extrusão termoplástica visando aplicação como embalagens. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial), Universidade Federal da Bahia, 2018.

DA SILVA, T.B.V. Produção e aplicação de embalagens ativas de TPS/PBAT por extrusão reativa contendo extrato da água do cozimento do pinhão. Campo Mourão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

DE ARAÚJO, F.F.; FARIAS, D.P.; NERI-NUMA, I.A.; PASTORE, G.M. Polyphenols and their applications: An approach in food chemistry and innovation potential. **Food Chemistry**, v. 338, 2021.

DE CARVALHO, F.A.; BILCK, A.P.; YAMASHITA, F.; MALI, S. Baked Foams Based on Cassava Starch Coated with Polyvinyl Alcohol with a Higher Degree of Hydrolysis. **Journal Of Polymers And The Environment** , v. 1, p. 1-8, 2017.

DE CARVALHO, F.A.; MOREIRA, A.A.; OLIVEIRA, A.L.M.; YAMASHITA, F. Biodegradation of poly(lactic acid)-cassava bagasse composites produced by injection molding. **Journal Of Applied Polymer Science**, v. 138, p. 50667, 2021.

DENARDIN, C.C.; DA SILVA, L.P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, v. 39 (3), p. 945-954, 2009.

DOBROWOLSKA-HAYWOOD, M. Liberarse de los microplásticos: Lecciones del proceso de cuidado de semillas de Croda e Incotec. **Croda Crop Care**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.crodacropcare.com/pt-br/sustainability/going-microplastic-free-blog> Acesso em 26/07/2024.

DOGANLAR, S.; FRARY, A.; TANKSLEY, S.D. The genetic basis of seed-weight variation: tomato as a model system. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 100(8), p. 1267-1273, 2000.

EMBRAPA. Tomate. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica,** 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/tomate>. Acesso em 24/04/2024.

EMPARANG, M.C.S.C.; KIM, S.R.; MOHAMMAD, F.A.; LEE, J.G.; CHO, M.G.; KIM, M.J.; JEONG, D.G.; PARK, K.M.; KANG, J.S. Effects of Mineral Filler Composition on Pellet Properties, Seed Quality, and Seedling Establishment of Pelleted Chinese Cabbage Seeds. **Agronomy**, v. 16, 2026.

EUROPEAN COMMISSION. **Commission Regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles**. Bruxelas, 2023.

FERREIRA, F.V.; CIVIDANES, L.S.; GOUVEIA, R.F.; LONA, L.M.F. An overview on properties and applications of poly(bu-tylene adipate-co- terephthalate)–PBAT based composites. **Polymer Engineering and Science**, 59, 2019.

FUKUSHIMA, K.; WU, M. H.; BOCCHINI, S.; RASYIDA, A.; YANG, M. C. PBAT based nanocomposites for medical and industrial applications. **Material Science Engineering: C**, v. 32 (6), p. 1331–1351, 2012.

FULLERTON, A.; FISCHER, T.; LAHTI, A.; WILHELM, K.P.; TAKIWAKI, H.; SERUP, J. Guidelines for measurement skin color and erythema: A report from the Standardization Group of the European Society of Contact Dermatitis. **Contact Dermatitis**, v. 35, p. 1-10, 1996.

GAIN. Tomatoes - the world's most popular vegetable. **Global Alliance for Improved Nutrition**, Genebra, 2020.

GARCIA, P.S.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F. Citric acid as multifunctional agent in blowing films of starch/PBAT. **Química Nova**, v. 34, p. 1507-1510, 2011.

GONTARD, N.; GUILBERT, S.; CUQ, J-L. Edible Wheat Gluten Films: Influence of the Main Process Variables on Film Properties using Response Surface Methodology. **Journal of Food Science**, v. 57(1), p. 190-199, 1992.

GORIM, L.; ASCH, F. Seed Coating Increases Seed Moisture Uptake and Restricts Embryonic Oxygen Availability in Germinating Cereal Seeds, **Biology**, v. 6(2), 2017.

GURNEY'S. Gurney's Seed and Nursery Co., s.d. Disponível em: <https://www.gurneys.com/>

HAN, J.G.; PARK, S.J. Fabrication of PBAT/polyethylene blends mulching film via blown film extrusion process. **Korea-Australia Rheology Journal**, v. 32(1), p. 79–86, 2020.

HAN, Y.; TENG, Y.; WANG, X.; REN, W.; WANG, X.; LUO, Y.; ZHANG, H.; CHRISTIE, P. Soil type driven change in microbial com-munity affects poly(butylene adipate-co-terephthalate) degradation potential. **Environmental Science and Technology**, 55(8),4648–4657, 2021.

HAO, Y.P.; LUO, T.; LYU, G.J.; WANG, C.; ZHOU, H.; YANG, G.H.; CHEN, J.H. Research progress of lignin-derived biodegradable composite film materials. **Journal of Guangdong University of Technology**, v. 39 (01), p. 21–33, 2022.

HE, Y.; HUANG, Y.; DAN, Y.; JIANG, L.; ZHANG, H.; LIU, H.; QI, Y. Agricultural beneficial microbes accelerate soil degradation of poly(butylene adipate-co terephthalate) (PBAT) films. **RSC Advances**, v. 15, 2025.

HE, M.; YANG, X.; XU, M.; LIU, C.; YUAN, B. Green synthesis of high-performance seed tape using *Camellia oleifera* shells: DES-extracted nano lignin/chitosan composites for enhancing UV shielding and plant growth. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 356, 2026.

IBGE. Em abril, IBGE prevê safra de 302,1 milhões de toneladas para 2023. **Agência de notícias**, 11/05/2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/36842-em-abril-ibge-preve-safra-de-302-1-milhoes-de-toneladas-para-2023#:~:text=TOMATE%20%E2%80%93%20A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de

ve%20alcan%C3%A7ar,previs%C3%A3o%20do%20m%C3%AAs%20de%20mar%C3%A7o.> Acesso em 11/11/2024.

IBGE. Produção de tomate. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, s.d. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/br>. Acesso em 11/11/2024.

JAVEED, T.; AFZAL, I.; SHABBIR, R.; IKRAM, K.; ZAHEER, M.S.; FAHEEM, M.; ALI, H.H.; IQBAL, J. Seed coating technology: An innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 21, 2022.

JIANG, X.; WANG, J.; ZHANG, J.; WANG, J.; GUO, W. Preparation of high-performance poly(butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch compounds with epoxidized soybean oil as compatibilizer. **Polymer Engineering & Science**, v. 63 (9), 2023.

JIANG, S.; LI, T.; LU, J.; CAI, F.; PANG, G.; LIU, J.; LIU, D.; SHEN, Q. From degradation to alleviation: *Trichoderma* facilitates plants resisting the PBAT stress through secreting a cutinase-like enzyme. **Environment International**, v. 210, 2026.

JHA, S.; AKULA, B.; ENYIOMA, H.; NOVAK, M.; AMIN, V.; LIANG, H. Biodegradable Biobased Polymers: A Review of the State of the Art, Challenges, and Future Directions. **Polymers**, v. 16, 2024.

JULINOVÁ, M.; VANHAROVÁ, L.; SASINKOVÁ, D.; KALENDOVÁ, A.; BURESOVA, I. Characterization and biodegradation of ternary blends of lignosulfonate/synthetic zeolite/polyvinylpyrrolidone for agricultural chemistry. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 31, 2022.

KIM, D.; SEO, J. A review: Breathable films for packaging applications. **Trends In Food Science & Technology**, v. 76, p. 15-27, 2018.

KIMURA, S.; SINHA, N. Tomato (*Solanum lycopersicum*): A Model Fruit-Bearing Crop. **Cold Spring Harbor Protocols**, v. 3(11), 2008.

KUCHLAN, P.; KUCHLAN, M.K.; ANSARI, M.M. Efficient application of *Trichoderma viride* on soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seed using thin layer polymer coating. **Legume Research**, v. 42(2), p. 260-264, 2019.

KÜSTER, A.N.; PAULA, C.; AZEVEDO, J.; SERRA, A.C.; COELHO, J.F.J. Formulations, Processing, and Application of Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/Thermoplastic Starch Blends: A Review. **Polymers**, v. 17, 2025.

LABORIAU, LG. On the physiology of seed germination in *Vicia graminea* Sm. I. Anais da Academia Brasileira de Ciências, n.42, p.235-262, 1970, *apud* RÊGO, M.T.C.; BARROS, J.R.A.; ANGELOTTI, F.; COSTA, N.D.; DANTAS, B.F. Germinação de sementes de cebola em diferentes concentrações de CO2 e temperatura. **20º Congresso Brasileiro De Agrometeorologia**, Juazeiro: 2017.

LARANJEIRA, R.K.S. Amidos de fontes não convencionais e sua aplicação em filmes biodegradáveis: fundamentos e aplicações. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de materiais). **Universidade Federal do Amazonas**, 2021.

LAURICHESSE, S.; AVÉROUS, L. Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 39, p. 1266-1290, 2014.

LEAL, I. L.; DA SILVA ROSA, Y. C.; DA SILVA PENHA, J.; CRUZ CORREIA, P. R.; DA SILVA MELO, P.; GUIMARÃES, D. H.; BARBOSA, J. D. V.; DRUZIAN, J. I.; MACHADO, B. A. S. Development and application starch films: PBAT with additives for evaluating the shelf life of Tommy Atkins mango in the fresh-cut state. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136(43), 2019.

LEBEDEV, V.; MIROSHNICHENKO, D.; VYTRYKUSH, N.; PYSHYEV, S.; MASIKEVYCH, A.; FILENKO, O.; TSERENIUK, O.; LYSENKO, L. Novel biodegradable polymers modified by humic acids. **Materials Chemistry and Physics**, v. 313, 2024.

LEKUBE, B.M.; FAHRNGRUBER, B.; KOZICH, M.; WASTYN, M.; BURGSTALLER, C. Influence of processing on the mechanical properties and morphology of starch-based blends for film application. **Journal of Applied Polymer Science**, 2019.

LI, J.; LAI, L.; WU, L.; SEVERTSON, S. J.; WANG, W. J. Enhancement of water vapor barrier properties of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) films with highly oriented organomontmorillonite. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, p. 6654–6662, 2018.

LI, P.; HOU, S.; ZHANG, Y.; ZHANG, K.; DENG, X.; SONG, H.; QIN, G.; ZHENG, Y.; LIU, W.; JI, S. Three-birds-with-one-stone: An eco-friendly and renewable humic acid-derived material application strategy for macrolide antibiotic detection and multifunctional composite film preparation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 476, 2024.

LI, X.; WU, J.; CHENG, X.; CAI, Z.; WANG, Z.; ZHOU, J. Biodegradable microplastics reduce the effectiveness of biofertilizers by altering rhizospheric microecological functions. **Journal of Environmental Management**, v. 352, 2024b.

LIAO, J.; BROSSE, N.; PIZZI, A.; HOPPE, S.; ZHOU, X.; DU, G. Characterization and 3D printability of poly (lactic acid)/acetylated tannin composites. **Industrial Crops and Products**, v. 149, 2020.

LIU, M.; WANG, C.; LIU, X.; LU, Y.; WANG, Y. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses. **Applied Soil Ecology**, v. 156, 2020.

LIU, W.; LIU, K.; CHEN, D.; ZHANG, Z.; LI, B.; EL-MOGY, M. M.; TIAN, S.; CHEN, T. *Solanum lycopersicum*, a Model Plant for the Studies in Developmental Biology, Stress Biology and Food Science. **Foods**, v. 11, 2022.

LIU, W.; YU, W.; WANG, J.; GAO, J.; DING, Y.; ZHANG, S.; ZHENG, Q. Enhanced mechanical and long-lasting antibacterial properties of starch/PBAT blown films via designing of reactive micro-crosslinked starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 266, 2024.

LOBO JUNIOR, M.; MACHADO-ROSA, T.A.; GERALDINE, A.M. Uso do *Trichoderma* na cultura do feijão-comum. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; DA

SILVA, J. C. ***Trichoderma*: uso na agricultura**. Brasília (DF): Embrapa, p. 393-406, 2019.

LODI, L. A.; BORGES, R.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; DE OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; RIBEIRO, C.; FARINAS, C. S. Biodegradable PVA-based films for delivery of *Bacillus megaterium* as seed coating. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, 2024.

LOTFALINEZHAD, E.; TAHERI, A.; RAZAVI, S. E.; SANEI, S. J. Preparation and assessment of alginate-microencapsulated *Trichoderma harzianum* for controlling *Sclerotinia sclerotiorum* and *Rhizoctonia solani* on tomato. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 259, 2024.

LU, L.; HAN, Y.; WANG, J.; XU, J.; LI, Y.; SUN, M.; ZHAO, F.; HE, C.; SUN, Y.; WANG, Y.; HUANG, P.; YU, X.; WANG, J.; YAN, Y. PBAT/PLA humic acid biodegradable film applied on solar greenhouse tomato plants increased lycopene and decreased total acid contents. **Science of the total environment**, v. 871, 2023.

LUO, C.; ZHOU, Y.; CHEN, Z.; BIAN, X.; CHEN, N.; LI, J.; WU, Y.; YANG, Z. Comparative life cycle assessment of PBAT from fossil-based and second-generation generation bio-based feedstocks. **Science of the total environment**, v. 924, 2024.

LUSTOSA, G. Com Corteva, Syngenta e Bayer, Milliken lança polímeros sem plástico para o agro. **AgFeed**, 2023. Disponível em: <https://agfeed.com.br/negocios/com-corteva-syngenta-e-bayer-milliken-lanca-polimeros-sem-plastico-para-o-agro/#>. Acesso em 13/11/2024.

MA, H.; QIN, W.; GUO, B.; LI, P. Effect of plant tannin and glycerol on thermoplastic starch: Mechanical, structural, antimicrobial and biodegradable properties. **Carbohydrate Polymers**, v. 29, 2022.

MAJEED, Z.; RAMLI, N. K.; MANSOR, N.; MAN, Z. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled release fertilizer processes. **Reviews In Chemical Engineering**, v. 31(1), p. 69-95, 2015.

MASTOURI, F.; BJÖRKMAN, T.; HARMAN, G.E. Seed Treatment with *Trichoderma harzianum* Alleviates Biotic, Abiotic, and Physiological Stresses in Germinating Seeds and Seedlings. **Phytopathology**, v. 11, p. 1213-1221, 2010.

MIELE, S.; TEGLI, S.; IZQUIERDO, C.G.; CERBONESCHI, M.; BARGIACCHI, E. Hydrolysable Tannins in Agriculture. In: AIRES, A. **Tannins - Structural Properties, Biological Properties and Current Knowledge**. Londres: Intech Open, p. 79-96, 2020.

MILETI, O.; MAMMOLETI, D.; BALDINO, N.; LUPI, F.R.; GABRIELE, D. Starch films loaded with tannin: the study of rheological and physical properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 254, 2024.

MOREIRA, A. A. **Desenvolvimento e aplicação de materiais biodegradáveis na agricultura**. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

MOREIRA, A. A.; DE CARVALHO, F. A.; BILCK, A. P.; DE PAULA, M. T.; MALI, S.; YAMASHITA, F.; DE OLIVEIRA, A. L. M. Tannin improves the processability and delays the biodegradability of poly (lactic acid)-starch-based thermoset materials

produced by injection molding made with renewable compounds. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 140, p. e53815, 2023.

MOREIRA, A. A.; MALI, S.; YAMASHITA, F.; BILCK, A. P.; DE PAULA, M. T.; MERCI, A.; DE 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.

MONTI, M. M.; PEDATA, P. A.; GUALTIERI, L.; RUOCCO, M. The Vocabulary of *Trichoderma*-Plant Interactions. In: SHARMA, A. K.; SHARMA, P. ***Trichoderma:* Host Pathogen Interactions and Applications**. Cingapura: Springer Nature Singapore Pte Ltd., p. 19-33, 2020.

MÜLLER, P.S.; CARPINÉ, D.; YAMASHITA, F.; WASZCZYNSKYL, N. Influence of pinhão starch and natural extracts on the performance of thermoplastic cassava starch/PBAT extruded blown films as a technological approach for bio-based packaging material. **Journal of Food Science**, v. 85(9), p. 2629-2959, 2020.

NASCIMENTO, W.M.; DE MELO, P.C.T.; DE FREITAS, R.A. Produção de Sementes. In: TEIXEIRA, F.M.V.; CLEMENTE, L.S.B. **Produção de tomate para processamento industrial**. Brasília: Embrapa, 2012.

NICOLOSI, M.M. Desenvolvimento de método de semeadura em sistema de plantio direto para agricultura familiar. Tese (Doutorado em Agronomia). **Universidade Estadual Paulista** (UNESP), 2016.

NICULESCU, M.D.; EPURE, D.G.; LASÓN-RYDEL, M.; GAIDAU, C.; GIDEA, M.; ENASCUTA, C. Biocomposites based on collagen and keratin with properties for agriculture and industrie applications. **The EuroBiotech Journal**, v. 3(3), p. 160-166 2019.

NIELSON, A. The seed sector's battle against microplastics. **Seed World**, 2024. Disponível em: <https://www.seedworld.com/us/2024/04/29/the-seed-sectors-battle-against-microplastics/#:~:text=Europe%20introduced%20legislation%20in%20October,state%20of%20the%20applied%20product.> Acesso em 24/06/2024.

NILSSON, F.; ELF, P.; CAPEZZA, A.; WEI, X.; TSEGAYE, B.; POLISETTI, V.; SVAGAN, A.J.; HEDENQVIST, M. Environmental concerns on water-soluble and biodegradable plastics and their applications – A review. **Science of the Total Environment**, v. 958, 2025.

OLIVATO, J.B.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F.; EIRAS, D.; PESSAN, L.A. Citric acid and maleic anhydride as compatibilizers in starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends by one-step reactive extrusion. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, p. 2614-2618, 2012.

OLIVATO, J.B.; GROSSMANN, M.V.E.; BILCK, A.P.; YAMASHITA, F. Effect of organic acids as additives on the performance of thermoplastic starch/polyester blown films. **Carbohydrate Polymers**, v. 90, p. 159–164, 2012.

OLIVATO, J.B.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F.; NOBREGA, M.M.; SCAPIN, M.R.S.; EIRAS, D.; PESSAN, L.A. Compatibilisation of starch/poly(butylene

adipate co-terephthalate) blends in blown films. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 46, p. 1934-1939, 2011.

OLIVEIRA, J.A.; GUIMARÃES, R.M.; ROSA, S.D.V.F. Processamento de sementes pós-colheita. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 232, p. 52-58, maio/jun. 2006.

DE OLIVEIRA, A. F.; SOLDI, V.; COELHO, C. M. M.; MIQUELOTO, A.; COIMBRA, J. L. M. Preparação, caracterização e propriedades de filmes poliméricos com potencial de aplicação no recobrimento de sementes. **Química nova**, v. 32(7), p. 1845-1849, 2009.

PARAVAR, A.; PIRI, R.; BALOUCHI, H.; MA, Y. Microbial seed coating: An attractive tool for sustainable agriculture. **Biotechnology Reports**, v. 37, 2023.

PATTARAUDOMCHOK, P.; WINOTAPUN, C.; THANOMJITR, D.; TAMEESRISUK, M.; WIJARANAKUL, P.; VICHAI, V.; LEELAPHIWAT, P.; HARARAK, B. Glycolipid-Coated Mangoes in Microperforated Film Packaging for Shelf-Life-Extended Application. **ACS Food Science & Technology**, v. 4 (12), p. 2857-2866, 2024.

PATRA, A.K.; SAXENA, J. A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. **Phytochemistry**, v. 71, p. 1198-1222, 2010.

PENG, W.; NIE, R.; LÜ, F.; ZHANG, H.; HE, P. Biodegradability of PBAT/PLA coated paper and bioplastic bags under anaerobic digestion. **Waste management**, v. 174, p. 218-228, 2024.

PEREIRA, J.F.; DE OLIVEIRA, A.L.M.; SARTORI, D.; YAMASHITA, F.; MALI, S. Perspectives on the Use of Biopolymeric Matrices as Carriers for Plant-Growth Promoting Bacteria in Agricultural Systems. **Microorganisms**, v. 11, 2023.

PEREIRA, R.B.; DA SILVA, P. P.; NASCIMENTO, W. M.; PINHEIRO, J. B. Tratamento de Sementes de Hortaliças. Circular técnica 140. Brasília, DF: **Embrapa Hortaliças**, 16 p., 2015.

PHILLIPS, T.M.; GREEN, J.; SANZ-SAEZ, A.; LOUF, J.F. Physical effects of hydrogel coatings on seed germination. **Soft Matter**, v. 22(3), p. 645-656, 2026.

PODZOROV, A.V.; SHIBRYAEVA, L.S.; CHAPLYGIN, M.E. Особенности технологии посева семян на лентах и жгутах. **Innovative Technologies and Equipment**, v. 18(3), p. 56-62, 2024.

QIN, K.; DONG, X.; JOSHI, V.; LEE, C.; HARVEY, J.T.; LESKOVAR, D.I. Biostimulant action of humic substances on tomato physiology and metabolism under water and nitrogen stresses. **Plant Stress**, v. 19, 2026.

RAMADA, M.H.S.; LOPES, F.A.C.; ULHOA, C.J. *Trichoderma:* metabólitos secundários. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; DA SILVA, J. C. ***Trichoderma*: uso na agricultura**. Brasília (DF): Embrapa, p. 323-338, 2019.

REIS, MÔNICA OLIVEIRA ; OLIVATO, JULIANA BONAMETTI ; BILCK, ANA PAULA ; ZANELA, JULIANO ; GROSSMANN, MARIA VICTORIA EIRAS ; Yamashita,

Fabio. Biodegradable trays of thermoplastic starch/poly (lactic acid) coated with beeswax. **Industrial Crops And Products**, v. 112, p. 481-487, 2018.

REN, J.; FU, H.; REN, T.; YUAN, W. Preparation, characterization and properties of binaryand ternary blends with thermoplastic starch, poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate). **Carbohydrate Polymers**, v. 77 (3), p. 576–58, 2009.

RUSETSKAYA, V.; RÓZALSKA, S.; SLABA, M.; BERNAT, P. Degradation ability of *Trichoderma* spp. in the presence of poly(butylene adipate-co-terephthalate) microparticles. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 193, 2024.

RUSIECKA, O.; HRYNKIEWICZ, K.; TRYKOWSKI, G.; SZEWCZYK, R.; BERNAT, P. Enzymatic biodegradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) microplastic by *Trichoderma harzianum* KKP534. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 213, 2026.

RYCHTER, P.; KAWALEC, M.; SOBOTA, M.; KURCOK, P.; KOWALCZUK, M. Study of Aliphatic-Aromatic Copolyester Degradation in Sandy Soil and Its Ecotoxicological Impact. **Biomacromolecules** v. 11, n. 4, p. 839–847, 2010.

SAVITHA, T.; SANKARANARAYANAN, A. Ameliorative characteristics of plant growth-enhancing microbes to revamp plant growth in an intricate environment. In: SWAPNIL, P.; MEENA, M.; HARISH; MARWAL, A.; VIJAYALAKSHMI, S.; ZEHRA, A. **Plant-Microbe Interaction—Recent Advances in Molecular and Biochemical Approaches.** Volume 2. Academic Press, p. 117-129, 2023.

SCAPIM, M.R.S. Produção, caracterização, aplicação e biodegradabilidade de filmes de amido e poli(butileno co-adipato tereftalato) produzidos por extrusão. **Universidade Estadual de Londrina** (UEL), 2009.

SCHUCH, J.Z.; LUCCA FILHO, O.A.; PESKE, S.T.; DUTRA, L.M.C.; BRANCÃO, M.F.; ROSENTHAL, M.D.A. Qualidade fisiológica e sanitária de sementes de arroz com diferentes graus de umidade e tratadas com fungicida. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, p. 45-33, 2006.

SEDOS. **Sedos**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.sedos.sk/>

SETH, K.; VYAS, P.; DEORA, S.; GUPTA, A.K.; MEENA, M.; SWAPNIL, P.; HARISH. Understanding plant-plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) interactions for inducing plant defense. In: SWAPNIL, P.; MEENA, M.; HARISH; MARWAL, A.; VIJAYALAKSHMI, S.; ZEHRA, A. **Plant-Microbe Interaction—Recent Advances in Molecular and Biochemical Approaches.** Volume 2. Academic Press, p. 201-219, 2023.

SHI, Z.; XIONG, L.; LI, Z.; SHAH, F.; YUAN, Q.; WHALEN, J.K.; WU, W. Biodegradable plastic exposure enhances microbial functional diversity while reducing taxonomic diversity across multi-kingdom soil microbiota in cherry tomato fields. **Communications Biology**, v. 8, 2025.

SILVA, F. D. B.; MEDEIROS-FILHO, S.; BEZERRA, A. M. E.; FREITAS, J. B. S.; ASSUNÇÃO, M. V. Pré-embebição e profundidade de semeadura na emergência de *Copernicia prunifera* (Miller). H. E Moore. 2009.

SILVA, P.R.F.; AVELAR, T.C.; DE SOUZA, B.R. Teste de germinação do milho em diferentes meios de cultivo. **Ciências Agrárias**, v. 29(140), p. 10-11, 2024.

SILVA, R. R. A.; MARQUES, C. S.; ARRUDA, T. R.; TEIXEIRA, S. C.; DE OLIVEIRA, T. V. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. **Macromolecules**, v. 3, p. 371–399, 2023.

SINGH, A.P.; KUMAR, S. Applications of Tannins in Industry. In: AIRES, A. **Tannins - Structural Properties, Biological Properties and Current Knowledge**. Londres: Intech Open, p. 117-135, 2020.

SOUSA, G. M., SOARES JÚNIOR, M. S., YAMASHITA, F. Active biodegradable films produced with blends of rice flour and poly(butylene adipate co-terephthalate): Effect of potassium sorbate on film characteristics**. Materials Science and Engineering: C**, v. 33(6), p. 3153–3159, 2013.

STEWART, A.; HILL, R. Biocontrol and Plant Growth Promotion. In: GUPTA, V.J.; SCHMOLL, M.; HERRERA-ESTRELLA, A.; UPADHYAY, R. S.; DRUZHININA, I.; TUOHY, M. G. **Biotechnology and Biology of *Trichoderma***. Oxford: Elsevier, p. 415-425, 2014.

SUTTONS. Seed Tapes. Suttons, [s.d.]. Disponível em: <https://www.suttons.co.uk/vegetable-seeds/groweasy-seed-tape/>

SWAMINATHAN, J.; VAN KOTEN, C.; HENDERSON, H.V.; JACKSON, H. V.; JACKSON, T.A.; WILSON, M.J. Formulations for delivering *Trichoderma atroviridae* spores as seed coatings, effects of temperature and relative humidity on storage stability. **Journal of Applied Microbiology**, v. 120(2), p. 425-431, 2016.

TALAMINI, V.; DE OLIVEIRA, F. A. Sementes com alta tecnologia - o futuro da lavoura. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123066/1/Sementes-com-alta.pdf>. Acesso em 29/06/2024.

TIAN, Y.; LEI, Q.; YANG, F.; XIE, J.; CHEN, C. Development of cinnamon essential oil-loaded PBAT/thermoplastic starch active packaging films with different release behavior and antimicrobial activity. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 263, 2024.

TSAHOURIDOU, P.C.; THANASSOULOPOULOS, C.C. Proliferation of *Trichoderma koningii* in tomato rhizosphere and the suppression of damping-off by *Sclerotium rolfsii*. **Soil Biology & Chemistry**, v. 34, p. 767-776, 2002.

VENKATESAN, R.; SURYA, S.; SUGANTHI, S.; MUTHURAMAMOORTHY, M.; PANDIARAJ, S; KIM, S. C. Biodegradable composites from poly(butylene adipate-co-terephthalate) with carbon nanoparticles: Preparation, characterization and performances. **Environmental Research**, v. 235, 2023.

VERCELHEZE, A.E.S.; MARIM, B. M.; OLIVEIRA, A. L. M.; MALI, S. Development of biodegradable coatings for maize seeds and their application for *Azospirillum brasilense* immobilization. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103(5), p. 2193-2203, 2019.

VIEIRA, E.L.; CARVALHO, Z.S. Fisiologia de sementes: Parte I - formação e germinação de sementes. **Boletim Científico Agronômico do CCAAB/UFRB**, v.1, e2259, 2023.

VIJAYKUMAR, S.; RAJESWARI, B.; KAVYA, M.; CHANDRIKA, K.S.V.P.; PRASAD, R.D.; PRASANNA, S. L.; YADAV, S.K. Programmable chitosan-based double layer seed coating for biotic and abiotic-stress tolerance in groundnut. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 275, 2024.

XAVIER, T.D.N. Síntese e aplicação de revestimentos à base de fécula, quitosana e cera de carnaúba na conservação pós-colheita da banana. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). **Universidade Federal Rural do Semi-Árido** (UFERSA), 2017.

WANG, G.; SUN, X.; WANG, K.; LONG, B.; LI, F.; XIE, D. Physiological and Multi-Omics Insights into *Trichoderma harzianum* Alleviating Aged Microplastic Stress in *Nicotiana benthamiana*. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26(23) 2025.

WANG, H.H.; ZHOE, S.J.; XIONG, S.J.; LIU, Q.; TIAN, H.; YU, S.; YUAN, T.Q. High-performance thermoplastic starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends through synergistic plasticization of epoxidized soybean oil and glycerol. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, 2023.

WEI, S.P.; XIE, Z. Q.; ZHAO, Y.L.; WANG, Q.Z.; WANG, Y.H.; ZHAO, J.Y. YIN, K.J.; ZHU, Z.H.; LIU, Y.; WU, M.; LI, Z.P. Potential inhibition of humic acid to soil-borne pathogenic fungi: A review. **Pedosphere**, 2024.

WENG, J.; ZHAI, X.; ZHANG, G.; SU, X.; YANG, Y.; DING, F.; WANG, W.; XU, J.; XIE, J. Densified and water-repellent biodegradable starch/PBAT composite films-packaged fertilizers: Prediction model, controlled-release mechanism and rice application. **Chemical Engineering Journal**, v. 475, 2023.

WENG, Y.-X., JIN, Y.-J., MENG, Q.-Y., WANG, L., ZHANG, M.; WANG, Y.-Z. Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. **Polymer Testing**, 32(5), 918–926, 2013.

WILPISZEWSKA, K.; ANTOSIK, A.K.; SPYCHAJ, T. Novel hydrophilic carboxymethyl starch/montmorillonite nanocomposite films. **Carbohydrate Polymers**, v. 158(5), p. 82-89, 2015.

WINOTAPUN, C.; KERDDONFAG, N.; KUMSANG, P.; HARARAK, B.; CHONHENCHOB, V.; YAMWONG, T.; CHINSIRIKUL, W. Microperforation of Three Common Plastic Films by Laser and Their Enhanced Oxygen Transmission for Fresh Produce Packaging. **Packaging Technology and Science**, 2014.

WU, F.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. **Progress in polymer science**, v. 117, 2021.

YANG, Y.; MIN, J.; XUE, T.; JIANG, P.; LIU, X.; PENG, R.; HUANG, J. W.; QU, Y.; LI, X.; MA, N.; TSAI, F. C.; DAI, L.; ZHANG; Q., LIU, Y.; CHEN, C. C.; GUO, R. T. Complete biodegradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) via engineered cutinases. **Nature Communications**, v. 14, 2023.

ZANELA, J.; SHIRAI, M.A.; OLIVATO, J.B.; CASAGRANDE, M., CANONICO, C.N.; WAGNER JUNIOR, A.; YAMASHITA, F. Active Biodegradable Starch/PBAT-poly(butylene adipate-co-terephthalate) Film with *Eucalyptus citriodora* Essential Oil Incorporation. **Foods**, v. 13(13), 2024.

ZHAI, X.; LI, M.; ZHANG, R.; WANG, W.; HOU, H. Extrusion-blown starch/PBAT biodegradable active films incorporated with high retentions of tea polyphenols and the release kinetics into food simulants. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 277, 2023.

ZHAI, X.; HAN, J.; CHANG, L.; ZHAO, F.; ZHANG, R.; WANG, W.; HOU, H. Effects of starch filling on physicochemical properties, functional activities, and release characteristics of PBAT-based biodegradable active films loaded with tea polyphenols. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 277, 2024.

ZHAI, X.; ZHANG, R.; CHENG, Y.; WANG, W.; HOU, H. Effects of co-plasticization of glycerol and small molecular esters on the physicochemical properties of extrusion-blown high-content starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) films. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 103 (10), 2023.

ZHANG, B.; LIU, D.; XI, X.; ZHANG, Y.; CHEN, C.; QU, J.; DONG, H.; ZHANG, R. The Analysis of the Applications of Crop Seed Tape Sowing Technology and Equipment: A Review. **Applied Sciences**, v. 11(23), 2021.

ZHAO, C.; YAN, X.; ZHOU, Z.; GUO, L.; YANG, S.; CHEN, Z.; JIA, F.; SONG, J.; GUO, J. Homogeneously Blending PBAT with Silanized Cellulose for Composite Film: Characterization and Physicochemical Property. **Polymers**, v. 18, 2026.

ZULLO, R.; IANNACE, S. The effects of different starch sources and plasticizers on film blowing of thermoplastic starch: Correlation among process, elongational properties and macromolecular structure. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, p. 376-383, 2009.