Campus Planaltina
Curso Superior de Bacharelado em Agronomia

ELLEN DE SOUZA NASCIMENTO

DESENVOLVIMENTO DE SACHÊS SEQUESTRADORES DE ETILENO COM PERMANGANATO DE POTÁSSIO E A QUALIDADE PÓS-COLHEITA DE TOMATES (*Solanum lycopersicum*) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO

Planaltina, DF
2026

DESENVOLVIMENTO DE SACHÊS SEQUESTRADORES DE ETILENO COM PERMANGANATO DE POTÁSSIO E A QUALIDADE PÓS-COLHEITA DE TOMATES (*Solanum lycopersicum*) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO

DEVELOPMENT OF POTASSIUM PERMANGANATE-BASED ETHYLENE SCAVENGER SACHETS AND THE POSTHARVEST QUALITY OF TOMATOES (*Solanum lycopersicum*) UNDER DIFFERENT STORAGE CONDITIONS

Ellen de Souza Nascimento[1]
Heloisa Alves de Figueiredo Sousa[2]

RESUMO

NASCIMENTO, Ellen de Souza. **Desenvolvimento de sachês sequestradores de etileno com permanganato de potássio e a qualidade pós-colheita de tomates (*Solanum lycopersicum*) sob diferentes condições de armazenamento**. 2026. Artigo (Agronomia) — Instituto Federal de Brasília, Brasília, 2026.

O tomate (Solanum lycopersicum L.) destaca-se entre as hortaliças de maior relevância econômica e alimentar no mundo. Entretanto, sua elevada atividade metabólica após a colheita favorece a rápida produção de etileno, acelerando o amadurecimento, a perda de qualidade e os prejuízos ao longo da cadeia de comercialização. Nesse contexto, o uso de tecnologias acessíveis para o controle do etileno representa uma alternativa promissora para ampliar a conservação pós-colheita. Este trabalho teve como objetivo produzir e avaliar sachês absorvedores de etileno à base de permanganato de potássio ($KMnO_4$), incorporados em matriz de sagu, na preservação da qualidade pós-colheita de tomates armazenados sob temperatura ambiente e refrigeração. O experimento foi conduzido com frutos em diferentes estágios de maturação, distribuídos nos tratamentos: tomates maduros, pouco verdes, verdes e controle sem seleção. Foram avaliados sólidos solúveis totais, pH, perda de massa e firmeza ao longo do armazenamento. Os resultados demonstraram que a refrigeração constituiu o principal fator de conservação, reduzindo a velocidade das transformações fisiológicas associadas ao amadurecimento. A associação entre baixa temperatura e sachês contendo $KMnO_4$ promoveu menor perda de massa, maior manutenção da firmeza, estabilidade do pH e retardamento das alterações nos sólidos solúveis. Os frutos colhidos em estágios menos avançados de maturação apresentaram melhor resposta ao sistema de conservação, evidenciando maior potencial de armazenamento. Conclui-se que os sachês absorvedores de etileno desenvolvidos constituem uma tecnologia simples, de baixo custo e eficiente para reduzir a ação do etileno, retardar o amadurecimento e preservar a qualidade pós-colheita dos tomates, especialmente quando associados à refrigeração, contribuindo para a redução das perdas e para o aumento da vida útil comercial dos frutos.

Palavras-chave: Tomate; Pós-colheita; Etileno; Permanganato de Potássio; Conservação.

[1]Graduanda em Agronomia pelo Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação de Brasília — Campus Planaltina. E-mail: ellen.nascimento@estudante.ifb.edu.br.
[2]Graduada em Engenharia de Alimentos pela UFV (2002), mestrado em Nutrição Humana pela UnB (2005), doutora em Agronomia pela UnB (2019). Docente do Instituto Federal de Brasília IFB - Campus Planaltina. E-mail: heloisa.falcao@ifb.edu.br

ABSTRACT

NASCIMENTO, Ellen de Souza. **Development of potassium permanganate-based ethylene scavenger sachets and the postharvest quality of tomatoes (Solanum lycopersicum) under different storage conditions.** 2026. Artigo (Agronomia) — Instituto Federal de Brasília, Brasília, 2026.

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most economically and nutritionally important vegetable crops worldwide. However, its high metabolic activity after harvest promotes rapid ethylene production, accelerating ripening, quality deterioration, and postharvest losses throughout the supply chain. In this context, the use of accessible technologies for ethylene control represents a promising strategy to extend postharvest conservation. This study aimed to produce and evaluate potassium permanganate ($KMnO_4$)-based ethylene scavenger sachets incorporated into a sago starch matrix for preserving the postharvest quality of tomatoes stored under ambient and refrigerated conditions. The experiment was conducted using fruits at different maturity stages, distributed into the following treatments: ripe tomatoes, breaker-stage tomatoes, green tomatoes, and an unclassified control group. Total soluble solids, pH, weight loss, and firmness were evaluated throughout the storage period. The results demonstrated that refrigeration was the main factor responsible for preserving fruit quality, reducing the rate of physiological changes associated with ripening. The combination of low temperature and $KMnO_4$-containing sachets resulted in lower weight loss, greater firmness retention, pH stability, and delayed changes in soluble solids content. Fruits harvested at earlier maturity stages showed a better response to the preservation system, indicating greater storage potential. It was concluded that the developed ethylene scavenger sachets constitute a simple, low-cost, and effective technology for reducing ethylene action, delaying ripening, and preserving the postharvest quality of tomatoes, particularly when associated with refrigeration, thereby contributing to reduced postharvest losses and extended commercial shelf life.

Keywords: Tomato; Postharvest; Ethylene; Potassium Permanganate; Preservation.

Data de aprovação: ____/____/_____

1. INTRODUÇÃO

O tomate (*Solanum lycopersicum L.*) ocupa posição estratégica entre as principais hortaliças cultivadas no mundo, não apenas pela expressiva participação econômica na cadeia produtiva de alimentos, mas também pela relevância nutricional atribuída aos seus frutos. Amplamente consumido em diferentes formas de apresentação, o tomate constitui importante fonte de vitaminas, minerais, fibras alimentares e compostos bioativos com reconhecida atividade antioxidante, especialmente o licopeno, carotenoide associado à proteção celular contra processos oxidativos e ao fortalecimento da qualidade nutricional da dieta humana (Fang; Wakisaka, 2021).

De acordo com dados do IBGE (2025), a produção de tomate no Brasil aparece com 4.755.782 toneladas de tomate, e o Centro-Oeste com 241.446 toneladas na atualização de setembro/2025. Isso coloca a região com cerca de 5,1% da produção nacional de tomate em 2025. Essa relevância está associada a ampla demanda de consumo e também pelos aspectos nutricionais do fruto que apresenta elevado teor de vitamina K, vitamina C, minerais e antioxidantes, além de compostos que promovem benefícios à saúde (FAO*,* 2022).

Apesar de sua importância, este fruto apresenta elevada perecibilidade após a colheita em razão de sua intensa atividade metabólica e da ação do etileno, hormônio diretamente associado ao amadurecimento dos frutos. Mesmo após a colheita, o tomate por ser um fruto climatério, permanecem fisiologicamente ativos, com aumento da respiração e da produção de etileno, o que promove alterações na coloração, textura, aroma e composição química. Embora essas mudanças sejam essenciais para a qualidade sensorial do fruto, sua rápida evolução reduz a vida útil e favorece perdas ao longo da cadeia de comercialização (Cocetta et al., 2020).

A deterioração pós-colheita do tomate representa um importante desafio para o setor produtivo. A perda de firmeza, a intensificação da transpiração, o consumo das reservas metabólicas e a maior suscetibilidade à ação de microrganismos comprometem a qualidade dos frutos e limitam seu período de comercialização (Zakriya et al., 2023). Como resultado, parte da produção é descartada antes do consumo, ampliando o desperdício de alimentos e reduzindo a eficiência dos sistemas agroalimentares.

Na busca por reduzir a perda pós-colheita de tomate, torna-se fundamental o desenvolvimento de tecnologias capazes de retardar o amadurecimento e a senescência dos frutos. Estratégias que reduzam a ação do etileno e desacelerem os processos fisiológicos pós-colheita contribuem para a manutenção da qualidade e para a ampliação da vida útil do tomate (FANG; WAKISAKA, 2021). Dentre estas, destacam-se os métodos que atuam diretamente sobre o metabolismo dos frutos, buscando retardar a evolução do amadurecimento sem comprometer a qualidade final do produto. E o uso de atmosfera modificada destaca-se por sua capacidade de alterar a composição gasosa ao redor dos frutos, reduzindo a disponibilidade de oxigênio e elevando os níveis de dióxido de carbono (Kawhena; Fawole; Opara, 2021). Essa condição promove diminuição da atividade respiratória, reduz o consumo de substratos energéticos e contribui para a manutenção dos atributos físicos, químicos e sensoriais durante o armazenamento (Cocetta et al., 2020).

E neste sentido o controle da concentração de etileno no ambiente de armazenamento tornou-se uma das abordagens mais promissoras para a conservação de frutos climatéricos, pois o etileno atua como principal regulador hormonal do amadurecimento, desencadeando uma série de respostas bioquímicas que aceleram a degradação da clorofila, a conversão de carboidratos, o amolecimento dos tecidos e a perda gradual da qualidade comercial (Wabali; Esiri, 2021).

Dessa forma, a remoção ou redução desse hormônio no ambiente de armazenamento representa uma alternativa eficiente para retardar a senescência e ampliar a vida útil dos produtos hortícolas (Gutierrez-Aguirre et al., 2023). Entre os sequestradores de etileno disponíveis, o permanganato de potássio ($KMnO_4$) tem recebido destaque em estudos recentes devido à sua elevada capacidade oxidante, baixo custo de aplicação e facilidade de incorporação em sistemas de embalagem. Seu mecanismo de ação baseia-se na oxidação do etileno presente na atmosfera, convertendo-o em compostos estáveis e reduzindo sua disponibilidade para os tecidos vegetais (Cerit; Demirkol, 2020). Como resultado, observa-se retardamento dos processos fisiológicos associados ao amadurecimento, incluindo redução da perda de massa, preservação da firmeza, manutenção da coloração e maior estabilidade dos compostos bioativos (Gutierrez-Aguirre et al., 2023; Belwal et al., 2025).

No caso específico do tomate, evidências científicas indicam que a combinação entre atmosfera modificada e sistemas de remoção de etileno apresenta potencial para reduzir a intensidade do metabolismo pós-colheita e preservar parâmetros essenciais de qualidade. Além de retardar a perda de peso e a degradação de compostos nutricionais, essas tecnologias favorecem a manutenção da aparência comercial dos frutos, característica determinante para sua aceitação no mercado consumidor (Cocetta et al., 2020).

Diante desse cenário, torna-se pertinente investigar estratégias acessíveis que integrem a remoção de etileno e o armazenamento em diferentes condições térmicas, contribuindo para o fortalecimento da sustentabilidade produtiva e da segurança alimentar. Assim, o presente estudo teve como objetivo produzir e avaliar o efeito de sachês absorvedores de etileno à base de sagu e permanganato de potássio ($KMnO_4$) na preservação da qualidade pós-colheita de tomates italianos (Solanum lycopersicum L.) armazenados sob refrigeração e em temperatura ambiente, com ênfase na redução da velocidade de amadurecimento, na minimização das perdas de massa e na ampliação da vida útil comercial dos frutos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Instituto Federal de Brasília, *Campus* Planaltina – DF, no laboratório de processamento de alimentos da unidade de Agroindústria. Foram utilizados tomates italianos que foram adquiridos em uma fazenda próxima ao local de realização do experimento, em Planaltina – DF, situada em Brasília.

Inicialmente, foi feita a separação e classificação dos tomates de acordo com o grau de maturação, sendo classificados como verdes, pouco verdes e maduros, e distribuídos em vasilhas identificadas.



Figura 1 – Características de seleção/separação dos tomates. (a) Tomates verdes; (b) Tomates pouco verdes; (c) Tomates maduros. Fonte: Foto dos Autores, 2025.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4 × 2, composto por quatro condições de maturação dos tomates (maduros, pouco verdes, verdes e um tratamento controle sem seleção e sem sachê) e duas temperaturas de armazenamento: ambiente e refrigeração (28,7 °C e 11 °C), totalizando oito tratamentos (Figuras 2 e 3).

Os tratamentos consistiram em: T1 - tomate maduro com sachê de $KMnO_4$, T2 - tomates pouco verdes com sachê de $KMnO_4$, T3 - tomates verdes com sachê de $KMnO_4$ e tratamento controle TC – sem seleção sem sachê, na Temperatura Ambiente e na Temperatura de Resfriamento TR1 - tomate maduro com sachê de $KMnO_4$, TR2 - tomates pouco verdes com sachê de $KMnO_4$, TR3 - tomates verdes com sachê de $KMnO_4$ e controle TRC – sem seleção e sem sachê. Foram utilizadas 30 repetições por tratamento na condição de temperatura ambiente e 10 repetições por tratamento na condição de baixa temperatura



Figura 2 – Tomates com sachê de Permanganato de Potássio ($KMnO_4$) em temperatura ambiente em processo de maturação. Fonte: Foto dos Autores, 2025.



Figura 3 - Tomates com sachês de permanganato de potássio em refrigeração. Fonte: Foto dos Autores, 2025.

A produção dos saches consistiu na pesagem de 500g de sagu de fécula de mandioca e dissolução de 55g do permanganato de potássio em 500ml de água destilada, conforme descrito em trabalho realizado por Amarante e Steffens (2009). A seguir, o sagu foi misturado na solução por 30 segundos para completa absorção da solução. Após secagem em condições ambiente do sagu impregnado, foi pesada 2 g e utilizado toucas de TNT descartáveis para confecção do suporte do tipo sachês.

Imediatamente, os sachês preparados (Figura 4) foram distribuídos entre os tratamentos nas condições de armazenamento em temperatura ambiente, sete sachês foram utilizados em cada uma das quatro vasilhas mantidas em temperatura ambiente. Os sachês

foram posicionados aleatoriamente abaixo dos frutos. Nos tratamentos refrigerados, foram adicionados cinco sachês em cada saco, o que garantiu exposição homogênea dos tomates ao absorvedor de etileno.



Figura 4 – Sachê de permanganato de potássio $KMnO_4$ no sagu de fécula de mandioca. Fonte: Foto dos Autores, 2025.

As análises físico-químicas avaliadas foram: perda de massa fresca, teor de sólidos solúveis, pH e firmeza.

A perda de massa fresca foi determinada em balança semi-analítica (URANO, US 15/5), considerando-se a diferença entre a massa inicial do fruto e aquela obtida em cada intervalo da amostragem, sendo o resultado expresso em porcentagem (%). As pesagens foram realizadas considerando o peso total das amostras contidas em cada vasilha e o peso das subamostras destinadas às avaliações laboratoriais.

O teor de sólidos solúveis (SS) foi determinado por leitura em refratômetro digital (ATAGO, Pocket Palm Perform) com escala variando de 0 até 30%, com compensação automática de temperatura. Para a análise, tomou-se 5 g de polpa (2 tomates batidos em liquidificador) e diluiu-se em 5,0 mL de água destilada, sendo posteriormente filtrado em papel filtro. As leituras foram registradas com precisão de 0,1 a 25ºC (AOAC, 2023). Os resultados foram expressos em percentagem (ºBrix).

O potencial hidrogeniônico (pH) da polpa dos frutos foi determinado por leitura direta em pHmetro digital portátil, previamente calibrado com soluções tampão padrão de pH 4,0 e 7,0. A calibração foi realizada antes das leituras, conforme as recomendações do fabricante, a fim de garantir maior precisão e confiabilidade dos resultados. Para a análise, as amostras de tomates foram trituradas e homogeneizadas até a obtenção de um extrato uniforme. Em seguida, o eletrodo do pHmetro foi introduzido diretamente no extrato, realizando-se a leitura após a estabilização do valor indicado pelo equipamento. Entre uma amostra e outra, o eletrodo foi higienizado com água destilada e seco cuidadosamente, evitando contaminação cruzada entre os tratamentos. As leituras foram realizadas em temperatura ambiente, e os resultados foram expressos em unidades de pH. Essa variável permitiu acompanhar as alterações químicas associadas ao amadurecimento e à senescência dos frutos, uma vez que variações no pH estão relacionadas ao metabolismo de ácidos orgânicos durante o armazenamento pós-colheita. A metodologia adotada foi baseada nos procedimentos oficiais descritos pela Association of Official Analytical Chemists para determinação de pH em produtos vegetais e frutas (AOAC, 2023).

A firmeza dos frutos foi avaliada com penetrômetro analógico aplicado em posição equatorial dos tomates. Os resultados, expressos em (kg/cm^2), permitiram identificar alterações estruturais associadas à perda de turgescência e à degradação da parede celular dos tecidos vegetais ao longo do armazenamento.

As avaliações foram realizadas aos 1, 3, 5, 7, 10, 12, 18, 20, 27 e 34 dias após o armazenamento (DA). Para a análise de resultados os dados experimentais foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados de forma comparativa entre os tratamentos e períodos de armazenamento. Os dados obtidos foram organizados e submetidos à análise estatística, sendo aplicada regressão polinomial para avaliar a cinética das variáveis ao longo do tempo. Adicionalmente, utilizou-se modelo polinomial com interação entre tratamento e tempo, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

A metodologia de análise dos resultados integrou abordagens quantitativa, comparativa e interpretativa. A abordagem interpretativa por gráficos correlacionou os resultados obtidos aos processos fisiológicos e metabólicos dos frutos, associando as alterações observadas à respiração, transpiração, degradação estrutural e amadurecimento pós-colheita. A integração dessas abordagens fortaleceu o rigor científico da pesquisa e permitiu uma interpretação consistente dos resultados.

2.1. Declaração de uso de Inteligência Artificial (IA)

Declara-se que, durante a busca pela atualização da revisão bibliográfica e introdução do trabalho, foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial Generativa, especificamente ChatGPT (OpenAI), Elicit AI e Perplexity AI, exclusivamente como instrumentos auxiliares de apoio às atividades acadêmicas para busca ativa por artigos científicos com rigor científico, atualizados no período de até 10 anos. E utilização na análise e discussão de resultados, por meio da criação de gráficos. O uso dessas tecnologias ocorreu em conformidade com os princípios éticos da integridade, da transparência metodológica, da autoria responsável e das diretrizes vigentes para utilização de Inteligência Artificial.

As ferramentas de Inteligência Artificial foram empregadas apenas para fins complementares de organização textual, produção de imagens, gráficos, figuras, aprimoramento da coesão e coerência textual, sistematização preliminar de informações, auxílio exploratório na busca de literatura científica e suporte à redação acadêmica. Nenhuma ferramenta de Inteligência Artificial foi utilizada como substituta da atividade intelectual, analítica, interpretativa ou autoral da docente responsável.

Todo o conteúdo produzido com apoio das ferramentas de Inteligência Artificial passou por supervisão humana integral, revisão crítica, verificação técnico-científica e adequação às normas acadêmicas vigentes, sob responsabilidade exclusiva da autora. Ressalta-se, ainda, que a utilização das ferramentas de Inteligência Artificial não envolveu inserção de informações protegidas por confidencialidade, observando-se os princípios da proteção de dados, segurança da informação e boas práticas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados das avaliações dos Tratamentos em Temperatura Ambiente

A Figura 5 apresenta os gráficos dos resultados em condições de temperatura ambiente (28,7 °C) das avaliações considerando os tratamentos ao longo dos dias de armazenamento.

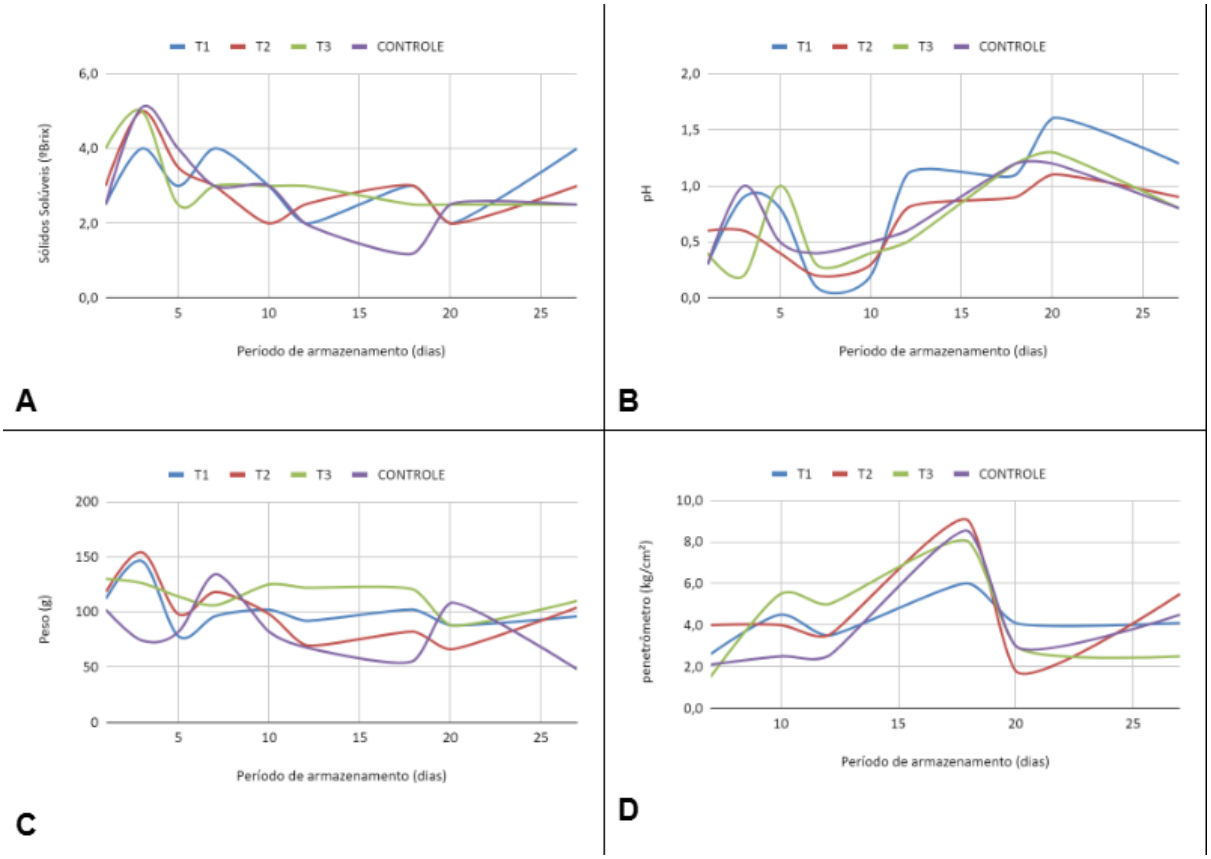


Figura 5 - Resultados das análises em condições de Temperatura Ambiente de Sólidos Solúveis Totais - SST (°Brix) (A), pH (B), perda de massa (g) (C) e Firmeza (kg/cm²) (D). Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

3.1.1. Sólidos Solúveis Totais (SST – °Brix)

Os sólidos solúveis totais apresentaram comportamento dinâmico ao longo do período de armazenamento (Figura 5A), refletindo as transformações metabólicas características do amadurecimento de frutos climatéricos. Nos primeiros dias de avaliação, observou-se aumento dos valores de SST em todos os tratamentos, com picos variando entre aproximadamente 5,0 e 5,2 °Brix, registrados entre o terceiro e o quinto dia de armazenamento. Esse incremento inicial está associado à hidrólise de polissacarídeos de reserva e à conversão de compostos estruturais em açúcares simples, processo intensificado pela ação do etileno durante o início do amadurecimento.

Após essa fase inicial, verificou-se tendência de redução dos SST, mais pronunciada no tratamento controle, que atingiu valores próximos de 1,2 °Brix por volta do 18º dia. Essa diminuição indica o consumo dos açúcares solúveis como substratos respiratórios, evidenciando o avanço da senescência dos tecidos. Ao final do armazenamento, o tratamento T1 apresentou o maior teor de sólidos solúveis (4,0 °Brix), seguido por T2 (3,0 °Brix), T3 (2,7 °Brix) e Controle (2,5 °Brix).

Na Tabela 1 estão apresentadas as equações de regressão polinomial de terceiro grau que descrevem a cinética de variação dos Sólidos Solúveis Totais (SST) dos frutos submetidos aos diferentes tratamentos em condições de temperatura ambiente durante o período de armazenamento. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,733 a 0,794, indicando ajuste satisfatório dos modelos para representar o comportamento dos SST ao longo do tempo.

Tabela 1. Equações de Regressão para variação de Sólidos Solúveis Totais (SST) em condições de Temperatura Ambiente ao longo dos dias de armazenamento.

Tratamento Temperatura Ambiente	**Regressão para SST** **Equação estimada** **y = SST (°Brix) e x = dias de armazenamento**	**R^2**
T1	$y = 0{,}00141x^3 - 0{,}05373x^2 + 0{,}48658x + 2{,}38256$	0,739
T2	$y = 0{,}00009x^3 + 0{,}00146x^2 - 0{,}14304x + 4{,}11386$	0,794
T3	$y = -0{,}00030x^3 + 0{,}01749x^2 - 0{,}32877x + 4{,}67576$	0,733
Controle	$y = 0{,}00116x^3 - 0{,}03723x^2 + 0{,}11226x + 4{,}19702$	0,793

O tratamento T1 apresentou equação com coeficiente cúbico positivo (0,00141) e coeficiente de determinação de 0,739, evidenciando um comportamento caracterizado por oscilações ao longo do armazenamento, com tendência de aumento dos SST nos períodos finais. Esse resultado sugere que houve continuidade dos processos de hidrólise de carboidratos complexos e conversão de reservas em açúcares solúveis, contribuindo para o incremento do teor de sólidos solúveis durante a maturação dos frutos.

Para o tratamento T2, a equação estimada apresentou o maior coeficiente de determinação entre os tratamentos (R^2 = 0,794). O modelo indica comportamento relativamente estável dos SST ao longo do armazenamento, seguido de leve redução nos períodos intermediários e posterior recuperação dos valores. Esse comportamento sugere equilíbrio entre a produção de açúcares decorrente do amadurecimento e o consumo desses compostos pela respiração celular.

No tratamento T3, observou-se tendência mais acentuada de redução dos SST durante o armazenamento, representada pelo coeficiente cúbico negativo (-0,00030) e pelo R^2 de 0,733. Esse comportamento indica maior utilização dos açúcares solúveis como substrato respiratório, resultando em redução gradual da concentração de SST ao longo do período avaliado. A menor disponibilidade de açúcares nos estágios finais pode estar associada ao avanço dos processos metabólicos relacionados à senescência.

O tratamento controle apresentou comportamento semelhante ao observado em T1, com oscilações nos teores de SST ao longo do armazenamento e tendência de recuperação dos valores nos períodos finais. A equação ajustada apresentou coeficiente de determinação de 0,793, indicando boa capacidade de representação dos dados. As variações observadas refletem a dinâmica natural do amadurecimento dos frutos, em que ocorre inicialmente

aumento dos açúcares pela degradação de reservas, seguido de sua utilização nos processos respiratórios.

De forma geral, os resultados demonstram que os tratamentos influenciaram a dinâmica dos sólidos solúveis durante o armazenamento. Enquanto T1 e Controle apresentaram tendência de manutenção ou incremento dos SST ao final do período, T3 mostrou maior redução dos teores de açúcares solúveis, indicando maior intensidade metabólica e respiratória. O tratamento T2 apresentou comportamento intermediário, evidenciando maior estabilidade dos SST ao longo do armazenamento.Assim, nos frutos T2 (pouco verdes com sachê de $KMnO_4$) e T3 (verdes com sachê de $KMnO_4$), os coeficientes negativos indicam redução dos SST ao longo do armazenamento. Entretanto, essa redução não necessariamente representa pior conservação, mas sim uma consequência do amadurecimento mais lento e gradual. Como esses frutos apresentavam menor produção inicial de etileno, o sachê absorvedor atuou de forma mais eficiente na contenção do pico climatérico, retardando a conversão acelerada dos carboidratos e reduzindo oscilações metabólicas intensas. Estudos demonstram que frutos colhidos em estágios verdes respondem mais intensamente ao controle do etileno do que frutos totalmente maduros (Gutierrez-Aguirre et al., 2023).

3.1.2. pH

Os valores de pH apresentaram tendência geral de elevação ao longo do armazenamento (Figura 5 B), embora com oscilações intermediárias entre os períodos avaliados. Inicialmente, os frutos exibiram valores reduzidos, variando entre 0,35 e 0,60, seguidos por aumento gradual até o final do experimento. O tratamento T1 (maduros com sachê de $KMnO_4$) atingiu o maior valor máximo observado (1,60), enquanto T2 (pouco verdes com sachê de $KMnO_4$), T3 (verdes com sachê de $KMnO_4$), e TC (sem seleção e sem sachê) apresentaram máximos de aproximadamente 1,10, 1,30 e 1,20, respectivamente.

A elevação do pH está relacionada à utilização dos ácidos orgânicos no metabolismo respiratório (principalmente dos ácidos cítrico e málico) que são consumidos para geração de energia celular durante o amadurecimento (Zakriya et al., 2023; Cocetta et al., 2020). Como consequência, ocorre redução da acidez dos tecidos e aumento progressivo do pH. O comportamento mais acentuado observado em T1 sugere maior degradação dos compostos ácidos durante o período experimental. Apesar disso, todos os tratamentos mantiveram tendência semelhante, demonstrando que o amadurecimento continuou ocorrendo mesmo na presença dos absorvedores de etileno, porém em intensidades distintas.

A Tabela 2 apresenta as equações de regressão polinomial de terceiro grau ajustadas para descrever a variação do pH dos frutos submetidos aos diferentes tratamentos em condições de temperatura ambiente durante o armazenamento. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,481 e 0,849, indicando capacidade moderada a elevada dos modelos em representar a dinâmica do pH ao longo do período avaliado.

Observa-se que todos os tratamentos apresentaram comportamento não linear, característico das alterações fisiológicas e bioquímicas que ocorrem durante o amadurecimento e a senescência dos frutos. De modo geral, as equações indicam tendência de aumento do pH ao longo do armazenamento, refletindo a redução gradual da acidez titulável decorrente do consumo dos ácidos orgânicos nos processos respiratórios.

Tabela 2. Equações de Regressão para variação de pH em condições de Temperatura Ambiente ao longo dos dias de armazenamento.

Tratamento Temperatura Ambiente	Regressão para pH Equação estimada y = pH e x = dias de armazenamento	R^2
T1	$y = -0{,}000355x^3 + 0{,}01486x^2 - 0{,}12478x + 0{,}73125$	0,522
T2	$y = -0{,}000389x^3 + 0{,}01651x^2 - 0{,}15569x + 0{,}71445$	0,849
T3	$y = -0{,}000267x^3 + 0{,}01049x^2 - 0{,}07175x + 0{,}48502$	0,481
Controle	$y = -0{,}000435x^3 + 0{,}01865x^2 - 0{,}19665x + 1{,}09978$	0,629

O tratamento T2 apresentou o melhor ajuste do modelo ($R^2 = 0{,}849$), indicando maior consistência na evolução do pH ao longo do tempo. A equação sugere aumento progressivo do pH durante a maior parte do armazenamento, evidenciando degradação contínua dos ácidos orgânicos e avanço do processo de amadurecimento. Esse comportamento demonstra que, embora submetidos ao sachê absorvedor de etileno, os frutos continuaram apresentando alterações metabólicas típicas da pós-colheita.

O tratamento T1 apresentou coeficiente de determinação de 0,522 e comportamento caracterizado por aumento do pH seguido de estabilização nos períodos finais. Esse resultado sugere intensa utilização inicial dos ácidos orgânicos como substratos respiratórios, com redução da velocidade das alterações metabólicas à medida que o fruto se aproxima dos estágios mais avançados de maturação.

Para o tratamento T3, observou-se o menor ajuste entre os modelos ($R^2 = 0{,}481$), indicando maior variabilidade dos dados experimentais. Ainda assim, a equação demonstra tendência de elevação do pH ao longo do armazenamento, embora em intensidade inferior à observada em T1 e T2. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de os frutos terem iniciado o armazenamento em estádio mais verde, apresentando metabolismo respiratório mais lento e maior preservação dos ácidos orgânicos.

O tratamento Controle apresentou coeficiente de determinação intermediário ($R^2 = 0{,}629$) e comportamento semelhante aos demais tratamentos, com aumento gradual do pH ao longo do período avaliado. A ausência do absorvedor de etileno pode ter contribuído para maior irregularidade na evolução fisiológica dos frutos, refletindo-se nas oscilações observadas ao longo da curva.

Sob o ponto de vista fisiológico, o aumento do pH constitui um indicativo do avanço do amadurecimento, uma vez que os ácidos orgânicos, especialmente os ácidos cítrico e málico, são utilizados como fonte de energia durante a respiração celular. Dessa forma, os resultados demonstram que todos os tratamentos apresentaram redução progressiva da acidez ao longo do armazenamento, embora em intensidades distintas. O tratamento T2 apresentou a evolução mais consistente dessa variável, enquanto T3 mostrou maior estabilidade, sugerindo menor intensidade metabólica e maior preservação das características químicas dos frutos durante o período de armazenamento.

3.1.3. Perda de Massa

A massa fresca dos frutos apresentou redução contínua durante o armazenamento (Figura 5 C), evidenciando a ocorrência simultânea dos processos de transpiração e

respiração. A perda de água para o ambiente e o consumo de reservas orgânicas constituem os principais fatores responsáveis pela diminuição da massa dos frutos após a colheita.

Os frutos do tratamento controle apresentaram a maior redução de massa, passando de aproximadamente 95 g para 50 g ao final do armazenamento, correspondendo a perda estimada de 47,4%. Em contraste, o tratamento T3 (verdes com sachê de $KMnO_4$) apresentou a menor redução, com perda aproximada de apenas 4,3%, enquanto T1 (maduros com sachê de $KMnO_4$) e T2 (pouco verdes com sachê de $KMnO_4$) registraram reduções intermediárias de 16,7% e 12,5%, respectivamente. Esses resultados indicam que os tratamentos contendo absorvedor de etileno contribuíram para a redução da intensidade respiratória e da transpiração, minimizando a perda de água e retardando a degradação dos tecidos.

A menor perda de massa observada em T3 (verdes com sachê de $KMnO_4$) sugere maior eficiência na manutenção da integridade fisiológica dos frutos, uma vez que a remoção do etileno reduz o metabolismo pós-colheita e, consequentemente, a velocidade de consumo das reservas energéticas. Resultados semelhantes foram descritos para diferentes frutos climatéricos tratados com permanganato de potássio, nos quais a absorção do etileno resultou em menor perda de peso e prolongamento da vida útil (Gutierrez-Aguirre et al., 2023; Zakriya et al., 2023; Belwal et al., 2025).

A Tabela 3 apresenta as equações de regressão polinomial de terceiro grau ajustadas para descrever a variação da massa dos frutos durante o armazenamento em condições de temperatura ambiente. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,823 a 0,842, demonstrando bom ajuste dos modelos e indicando que as equações representam adequadamente a dinâmica da perda de massa ao longo do período experimental.

De maneira geral, todos os tratamentos apresentaram redução da massa dos frutos ao longo do armazenamento, comportamento esperado para produtos hortícolas após a colheita. A perda de massa está diretamente relacionada aos processos fisiológicos de transpiração e respiração, que promovem a perda de água e o consumo das reservas orgânicas utilizadas na manutenção do metabolismo celular.

Tabela 3. Equações de Regressão para variação da perda de massa em condições de Temperatura Ambiente ao longo dos dias de armazenamento.

Tratamento Temperatura Ambiente	**Regressão para Perda de Massa** **Equação estimada** **y = perda de massa e x = dias de armazenamento**	**R^2**
T1	$y = -0{,}00478x^3 + 0{,}40247x^2 - 8{,}84959x + 140{,}41821$	0,841
T2	$y = 0{,}02005x^3 - 0{,}58154x^2 + 0{,}21488x + 129{,}29086$	0,823
T3	$y = -0{,}00586x^3 + 0{,}20676x^2 - 1{,}55934x + 116{,}52284$	0,842
Controle	$y = 0{,}02632x^3 - 1{,}16411x^2 + 11{,}38769x + 73{,}45333$	0,833

O tratamento T1 apresentou equação com coeficiente de determinação de 0,841, evidenciando redução progressiva da massa durante o armazenamento. O comportamento da curva sugere perda contínua de água e intensificação dos processos metabólicos ao longo do tempo, característica de frutos que iniciaram o armazenamento em estádio mais avançado de maturação.

O tratamento T2 apresentou R^2 de 0,823 e comportamento semelhante ao observado em T1, porém com oscilações mais pronunciadas ao longo da curva. Esse resultado indica que, embora tenha ocorrido perda de massa durante todo o período de armazenamento, a intensidade do processo variou em função das alterações fisiológicas associadas ao

amadurecimento dos frutos. O tratamento T3 apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,842$) e a curva mais estável entre os tratamentos avaliados. A menor intensidade das variações observadas sugere maior conservação da massa fresca dos frutos, possivelmente em razão do estádio inicial mais verde e da ação do sachê absorvedor de etileno, fatores que podem ter contribuído para retardar os processos de amadurecimento, transpiração e senescência.

O tratamento Controle apresentou coeficiente de determinação de 0,833 e comportamento caracterizado por maior amplitude das variações ao longo do armazenamento. A ausência do absorvedor de etileno favorece a aceleração do amadurecimento e do metabolismo respiratório, aumentando a perda de água e o consumo das reservas energéticas. Consequentemente, os frutos desse tratamento tendem a apresentar maior redução da massa fresca ao longo do período de armazenamento.

Os resultados indicam que a perda de massa foi influenciada tanto pelo estádio de maturação inicial quanto pela utilização do sachê absorvedor de etileno. Os tratamentos contendo frutos mais verdes, especialmente T3, apresentaram maior capacidade de conservação da massa fresca, enquanto os frutos mais maduros e aqueles mantidos sem proteção apresentaram perdas mais acentuadas. Esses resultados reforçam a importância do controle do etileno na redução da intensidade respiratória e na manutenção da qualidade pós-colheita dos frutos armazenados em temperatura ambiente.

3.1.4. Firmeza

A firmeza dos frutos apresentou comportamento distinto das demais variáveis, caracterizado por aumento gradual até aproximadamente o 18º dia de armazenamento, seguido por redução acentuada nos períodos subsequentes (Figura 5 D). Os maiores valores foram observados em T2 (9,1 kg cm^{-2}), T3 (8,5 kg cm^{-2}) e Controle (8,3 kg cm^{-2}), enquanto T1 atingiu máximo de aproximadamente 6,2 kg cm^{-2}.

Ao final do armazenamento, T2 manteve o maior valor de firmeza residual (5,5 kg cm^{-2}), seguido pelo Controle (4,3 kg cm^{-2}), T1 (4,0 kg cm^{-2}) e T3 (2,4 kg cm^{-2}). A manutenção da firmeza está diretamente relacionada à preservação da estrutura da parede celular e da lamela média, especialmente dos compostos pécticos. Durante o amadurecimento ocorre ativação de enzimas como poligalacturonase, pectinametilesterase e celulase, responsáveis pela solubilização das pectinas e consequente amolecimento dos tecidos (Wabali; Esiri, 2021; Cocetta et al., 2020).

Os resultados indicam que T2 (pouco verdes com sachê de $KMnO_4$) apresentou maior capacidade de retardar a degradação estrutural da parede celular, preservando a resistência mecânica dos frutos por período mais prolongado. Tal comportamento está de acordo com estudos que demonstram que a remoção do etileno por absorvedores à base de permanganato de potássio reduz a velocidade de amadurecimento e retarda a perda de firmeza em frutos climatéricos (Wabali; Esiri, 2021; Gutierrez-Aguirre et al., 2023; Belwal et al., 2025).

3.1.5. Análise Conjunta

A análise conjunta dos parâmetros físico-químicos evidência que os tratamentos contendo absorvedor de etileno influenciaram significativamente a dinâmica metabólica dos tomates armazenados em temperatura ambiente.

Os tratamentos retardaram as transformações associadas ao amadurecimento, reduzindo a perda de massa, preservando os sólidos solúveis e contribuindo para a manutenção da firmeza dos frutos. Entre os tratamentos avaliados, T3 (verdes com sachê de $KMnO_4$) apresentou a menor perda de peso, enquanto T2 (pouco verdes com sachê de $KMnO_4$) foi mais eficiente na preservação da firmeza, característica diretamente associada à aceitação comercial. Por sua vez, T1(maduros com sachê de $KMnO_4$) manteve os maiores teores de sólidos solúveis ao final do armazenamento, sugerindo menor consumo dos açúcares pelo metabolismo respiratório.

Em contraste, os frutos do tratamento controle apresentaram maior perda de massa e redução mais acentuada dos atributos de qualidade, evidenciando o papel do etileno na aceleração dos processos de amadurecimento e senescência.

Dessa forma, os resultados reforçam o potencial do uso de sachês absorvedores de etileno à base de permanganato de potássio como estratégia para reduzir a velocidade das alterações fisiológicas pós-colheita e prolongar a vida útil de tomates armazenados em condições ambientais, corroborando observações descritas para outros frutos climatéricos submetidos ao controle da atmosfera de armazenamento.

3.2. Resultados das avaliações dos Tratamentos em Temperatura de Refrigeração

A Figura 6 apresenta os resultados das avaliações em condições de temperatura de resfriamento (11 °C) considerando os tratamentos ao longo dos dias de armazenamento.

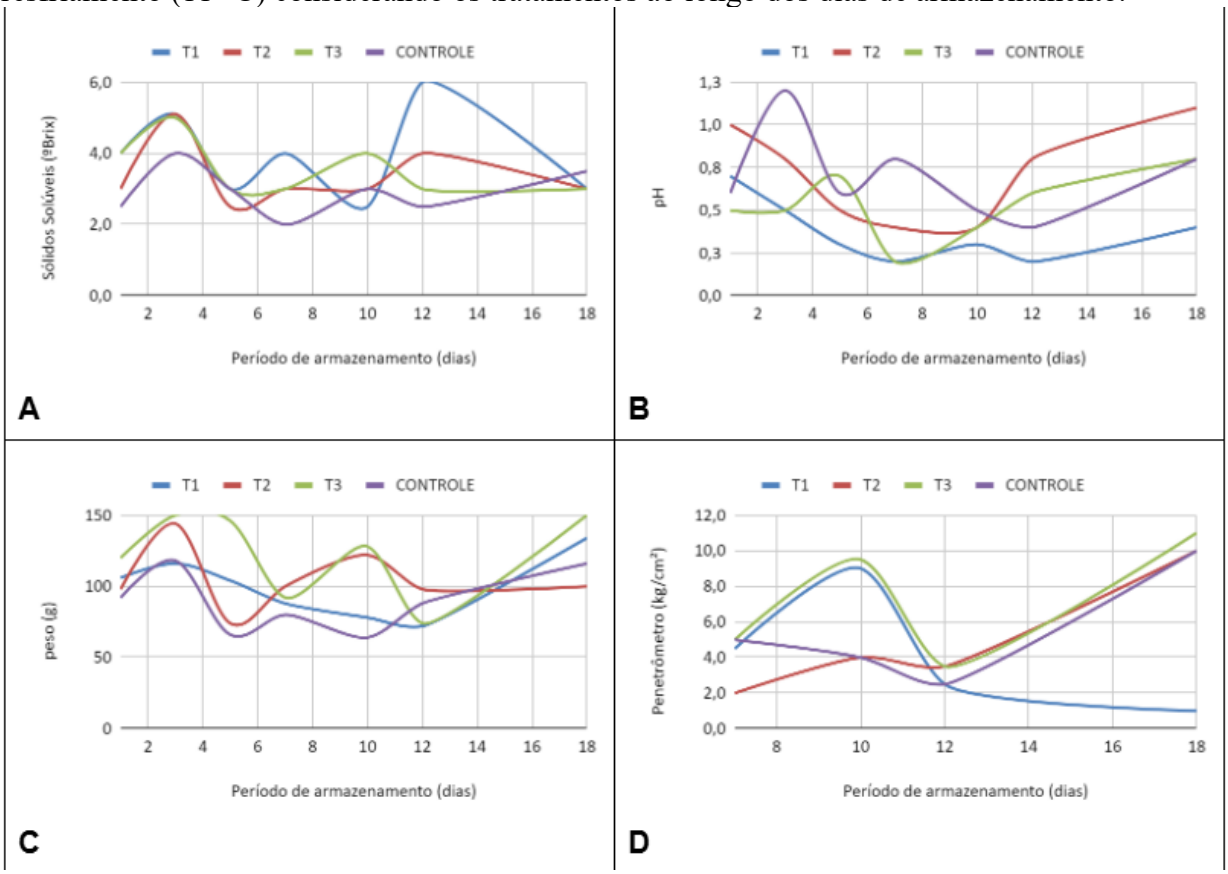


Figura 6. Resultados das análises em condições de Temperatura de Refrigeração de Sólidos Solúveis Totais - SST (°Brix) (A), pH (B), perda de massa (g) (C) e Firmeza (kg/cm²) (D). Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

3.2.1. Sólidos Solúveis Totais (SST – °Brix)

Os valores de sólidos solúveis totais (Figura 6 A) apresentaram comportamento oscilatório ao longo do armazenamento refrigerado, evidenciando diferenças entre os estádios de maturação dos frutos e a atuação do sachê absorvedor de etileno à base de permanganato de potássio ($KMnO_4$).

Nos tomates maduros tratados com $KMnO_4$ (T1), os SST variaram de aproximadamente 3,5 °Brix no início do armazenamento para um pico de 6,0 °Brix aos 12 dias, reduzindo posteriormente para cerca de 3,2 °Brix aos 18 dias. Os tomates pouco verdes (T2) apresentaram aumento inicial até aproximadamente 5,0 °Brix aos 3 dias, seguido de redução para 2,5 °Brix aos 6 dias e estabilização entre 3,0 e 4,0 °Brix até o final do período. Os frutos verdes tratados (T3) exibiram comportamento semelhante, com valores entre 3,0 e 5,0 °Brix durante o armazenamento. O tratamento controle (TC) apresentou menor amplitude de variação, mantendo-se entre 2,0 e 4,0 °Brix.

O aumento inicial dos SST resulta da hidrólise dos polissacarídeos de reserva e da conversão do amido em açúcares solúveis durante o amadurecimento. Posteriormente, a redução observada principalmente em T1 indica utilização desses açúcares como substrato respiratório. A presença do $KMnO_4$ provavelmente retardou a velocidade dessa conversão ao remover parte do etileno do ambiente de armazenamento, reduzindo a intensidade do processo de respiração vegetal.

Na tabela 4 estão apresentadas as equações de regressão que representa a cinética de variação do SST por tratamento ao longo dos dias de armazenamento. Foram obtidas equações de regressão polinomial de terceiro grau ajustadas para descrever a variação dos Sólidos Solúveis Totais (SST) dos frutos armazenados sob refrigeração. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,781 a 0,882, demonstrando bom ajuste dos modelos e indicando que as equações representam adequadamente a dinâmica dos SST ao longo do período de armazenamento.

Observa-se que todos os tratamentos apresentaram comportamento não linear, evidenciando oscilações na concentração de açúcares solúveis ao longo do armazenamento refrigerado. Essas variações refletem o equilíbrio entre os processos de síntese, conversão e consumo de carboidratos durante o amadurecimento e a manutenção do metabolismo respiratório dos frutos.

Tabela 4. Equações de Regressão para variação de Sólidos Solúveis Totais (SST) em condições de Temperatura de Refrigeração ao longo dos dias de armazenamento.

Tratamento Temperatura Refrigeração	**Regressão para SST** **Equação estimada** **y = SST (°Brix) e x = dias de armazenamento**	**R^2**
T1	$y = -0{,}0052x^3 + 0{,}1761x^2 - 1{,}5048x + 6{,}1327$	0,882
T2	$y = -0{,}0018x^3 + 0{,}0604x^2 - 0{,}6883x + 5{,}0441$	0,815
T3	$y = -0{,}0036x^3 + 0{,}1195x^2 - 1{,}0526x + 5{,}8113$	0,864
Controle	$y = 0{,}0014x^3 - 0{,}0497x^2 + 0{,}3926x + 2{,}9587$	0,781

O tratamento T1 apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0{,}882$) e a maior amplitude de variação dos SST ao longo do período experimental. A equação indica redução inicial dos teores de sólidos solúveis, seguida por aumento expressivo próximo à

metade do armazenamento e posterior declínio nos períodos finais. Esse comportamento sugere intensa atividade metabólica associada ao amadurecimento, característica de frutos que já se encontravam em estádio mais avançado de maturação no início do armazenamento. O aumento temporário dos SST pode estar relacionado à degradação de polissacarídeos e à conversão de reservas em açúcares simples, enquanto a redução posterior pode refletir o consumo desses compostos na respiração celular.

O tratamento T2 apresentou comportamento mais estável ao longo do armazenamento, com R^2 de 0,815. As oscilações observadas foram menos intensas quando comparadas a T1, indicando menor velocidade de amadurecimento e maior conservação dos açúcares solúveis. Esse resultado sugere que a refrigeração associada ao sachê absorvedor de etileno contribuiu para retardar os processos fisiológicos responsáveis pelo aumento dos SST.

No tratamento T3, o modelo apresentou R^2 de 0,864 e comportamento intermediário entre T1 e T2. Os frutos iniciaram o armazenamento em estádio mais verde, o que favoreceu menor intensidade respiratória e maior preservação das reservas energéticas. A curva evidencia variações moderadas dos SST ao longo do período experimental, indicando que a combinação entre estádio inicial menos avançado e absorção de etileno foi eficiente em retardar o amadurecimento.

O tratamento Controle apresentou o menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,781$) e comportamento caracterizado por menores oscilações na concentração de SST ao longo do armazenamento. Embora tenha ocorrido aumento gradual dos teores de açúcares nos períodos finais, a ausência do sachê absorvedor de etileno permitiu a evolução natural do amadurecimento, porém em intensidade inferior à observada em T1.

De forma geral, os resultados demonstram que a refrigeração contribuiu para reduzir a velocidade das alterações metabólicas associadas ao amadurecimento dos frutos. Os tratamentos T2 e T3 apresentaram maior estabilidade dos SST ao longo do armazenamento, indicando maior eficiência na preservação da qualidade química dos frutos. Por outro lado, T1 apresentou maiores oscilações e incremento temporário dos sólidos solúveis, comportamento compatível com frutos que já haviam iniciado o processo climatérico antes da instalação dos tratamentos.

Esses resultados reforçam que a eficiência do absorvedor de etileno tende a ser maior quando aplicado em frutos colhidos em estádios menos avançados de maturação. Esse resultado sugere que a ação do $KMnO_4$ foi mais eficiente nesses estádios fisiológicos, retardando a biossíntese e a ação do etileno, reduzindo a velocidade de hidrólise dos carboidratos e prolongando o período pré-climatérico. Como consequência, os frutos mantiveram concentrações mais estáveis de SST durante o armazenamento refrigerado.

O tratamento controle apresentou discreta tendência de aumento dos SST, porém inferior à observada em T1. Esse comportamento demonstra que a ausência de seleção dos frutos e a inexistência do sachê absorvedor permitiram a ocorrência de amadurecimento natural, embora de forma menos intensa do que nos frutos maduros inicialmente selecionados. Sob a perspectiva fisiológica, esses resultados confirmam que a remoção do etileno apresenta maior eficiência quando aplicada antes do estabelecimento do pico climatérico, momento em que os mecanismos autocatalíticos de produção hormonal ainda não se encontram plenamente ativados.

3.2.2. pH

Os resultados para o pH (Figura 6 B) apresentou variações compatíveis com a dinâmica metabólica do amadurecimento. Os tomates maduros tratados (T1) reduziram o pH de aproximadamente 0,75 para 0,25 até o 12º dia, elevando-se posteriormente para cerca de 0,42. Em T2, observou-se redução gradual de 1,0 para 0,4 até o 10º dia, seguida de aumento até 1,1 ao final do armazenamento. Os frutos verdes tratados (T3) apresentaram comportamento semelhante, variando de 0,5 para 0,25 e retornando para 0,8. O controle mostrou oscilações mais intensas durante todo o período.

A redução inicial do pH está associada ao acúmulo de ácidos orgânicos oriundos do metabolismo respiratório. Posteriormente, a elevação observada nos tratamentos indica consumo desses compostos como substratos energéticos durante a senescência. A remoção do etileno pelo $KMnO_4$ reduz a atividade respiratória e prolonga a manutenção do equilíbrio ácido-base dos tecidos, retardando alterações metabólicas típicas do amadurecimento.

A Tabela 5 apresenta as equações de regressão polinomial de terceiro grau ajustadas para descrever a variação do pH dos frutos armazenados sob refrigeração. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,841 a 0,903, evidenciando excelente ajuste dos modelos aos dados observados e permitindo caracterizar adequadamente a dinâmica das alterações ácido-base durante o período de armazenamento.

De modo geral, todos os tratamentos apresentaram comportamento não linear do pH, caracterizado por redução inicial seguida de estabilização ou aumento gradual nos períodos finais de armazenamento. Esse comportamento é típico de frutos armazenados sob refrigeração, condição que reduz a taxa respiratória e retarda as transformações bioquímicas associadas ao amadurecimento.

Tabela 5. Equações de Regressão para variação de pH em condições de Temperatura de Refrigeração ao longo dos dias de armazenamento.

Tratamento Temperatura Refrigeração	**Regressão para pH** **Equação estimada** **y = pH e x = dias de armazenamento**	**R^2**
T1	$y = -0{,}00042x^3 + 0{,}0189x^2 - 0{,}2427x + 1{,}0875$	0,841
T2	$y = -0{,}00031x^3 + 0{,}0151x^2 - 0{,}1894x + 1{,}1148$	0,903
T3	$y = -0{,}00027x^3 + 0{,}0118x^2 - 0{,}1332x + 0{,}8641$	0,862
Controle	$y = -0{,}00058x^3 + 0{,}0244x^2 - 0{,}2861x + 1{,}3352$	0,888

As tendências observadas para o pH demonstram diferenças no metabolismo dos ácidos orgânicos durante o armazenamento refrigerado. O tratamento T1 apresentou coeficiente de determinação de 0,841 e comportamento marcado por redução mais pronunciada dos valores de pH durante grande parte do armazenamento. A curva indica manutenção da acidez dos frutos por período mais prolongado, sugerindo que os processos de degradação dos ácidos orgânicos ocorreram de forma mais lenta. Esse resultado pode estar relacionado ao estádio de maturação mais avançado dos frutos no início do armazenamento, associado à redução da atividade metabólica promovida pela refrigeração.

O tratamento T2 apresentou o maior coeficiente de determinação entre os tratamentos avaliados ($R^2 = 0{,}903$), demonstrando elevada consistência na evolução da variável. A equação evidencia redução inicial do pH, seguida de recuperação gradual nos períodos

posteriores. Esse comportamento sugere equilíbrio entre a utilização dos ácidos orgânicos na respiração celular e a desaceleração metabólica promovida pela combinação entre refrigeração e absorção de etileno.

No tratamento T3, observou-se comportamento semelhante ao de T2, com R^2 de 0,862. Os frutos colhidos em estádio mais verde apresentaram variações mais suaves do pH ao longo do armazenamento, indicando maior estabilidade química. A recuperação gradual dos valores de pH nos períodos finais sugere utilização lenta e contínua dos ácidos orgânicos, compatível com menor intensidade respiratória e retardamento do amadurecimento.

O tratamento controle apresentou coeficiente de determinação de 0,888 e comportamento caracterizado por maior amplitude de variação ao longo do armazenamento. A ausência do sachê absorvedor de etileno favorece a evolução natural do amadurecimento, resultando em alterações mais acentuadas na composição ácida dos frutos. Apesar da refrigeração ter reduzido a velocidade dessas mudanças, observou-se maior instabilidade do pH em comparação aos tratamentos com absorção de etileno.

Sob o ponto de vista fisiológico, as alterações observadas refletem a dinâmica de utilização dos ácidos orgânicos como substratos respiratórios durante o armazenamento. A refrigeração associada ao sachê absorvedor de etileno contribuiu para reduzir a intensidade das transformações metabólicas, promovendo maior estabilidade do pH e retardando o avanço do amadurecimento. Os tratamentos T2 e T3 destacaram-se pela maior regularidade das curvas e pela manutenção mais equilibrada da acidez, indicando maior eficiência na preservação da qualidade química dos frutos durante o armazenamento refrigerado.

3.2.3. Perda de Massa

Os resultados para a perda de massa nos tratamentos em condições de refrigeração (Figura 6C) evidenciam perdas associadas à transpiração e respiração dos frutos. O T1 iniciou com aproximadamente 100 g, atingiu 120 g aos 3 dias e reduziu para cerca de 75 g aos 12 dias e posteriormente perda elevada de 130 g. T2 variou entre 95 e 145 g de perda de massa. T3 apresentou os maiores valores finais, alcançando perda de aproximadamente 150 g aos 18 dias. O controle apresentou oscilações intermediárias.

Embora o gráfico (Figura 6C) apresente variações decorrentes da dispersão experimental, observa-se que os tratamentos contendo $KMnO_4$ mantiveram maior massa (menor perda de massa) ao final do armazenamento, especialmente T3. Esse resultado sugere menor perda de água e menor intensidade respiratória. O $KMnO_4$ oxida o etileno presente no ambiente, reduzindo sua concentração e retardando processos fisiológicos relacionados à transpiração e degradação celular. Estudos demonstram reduções significativas na perda de massa em frutos armazenados com absorvedores de etileno (Cocetta et al., 2020; Zakriya et al., 2023; Gutierrez-Aguirre et al., 2023).

A Tabela 6 apresenta as equações de regressão polinomial de terceiro grau ajustadas para descrever a variação da massa dos frutos armazenados sob refrigeração. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,875 a 0,919, demonstrando excelente ajuste dos modelos aos dados observados e evidenciando que as equações representam adequadamente a dinâmica da perda de massa durante o período de armazenamento.

De modo geral, todos os tratamentos apresentaram comportamento não linear, caracterizado por redução da massa nos períodos intermediários, seguida de estabilização ou recuperação parcial dos valores observados ao final do armazenamento. Esse comportamento

reflete a interação entre os processos de transpiração, respiração e conservação da água nos tecidos vegetais sob condições de refrigeração.

Tabela 6. Equações de Regressão para variação da perda de massa em condições de Temperatura Refrigeração ao longo dos dias de armazenamento.

Tratamento Temperatura Refrigeração	**Regressão para Perda de Massa** **Equação estimada** **y = perda de massa e x = dias de armazenamento**	**R^2**
T1	$y = 0,0198x^3 - 0,7184x^2 + 7,1026x + 89,6154$	0,901
T2	$y = 0,0134x^3 - 0,4927x^2 + 4,2683x + 98,7745$	0,875
T3	$y = 0,0221x^3 - 0,8179x^2 + 8,6412x + 101,3378$	0,919
Controle	$y = 0,0157x^3 - 0,6048x^2 + 5,5847x + 84,9361$	0,884

O tratamento T3 apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,919$) e a curva mais estável entre os tratamentos avaliados. Os frutos colhidos no estádio verde e armazenados com sachê absorvedor de etileno apresentaram menor intensidade das oscilações na massa ao longo do período experimental, indicando maior conservação da massa fresca. Esse resultado sugere que a combinação entre menor grau de maturação inicial, refrigeração e remoção do etileno foi eficiente em retardar os processos fisiológicos responsáveis pela perda de água e pelo consumo das reservas metabólicas.

O tratamento T1 apresentou coeficiente de determinação de 0,901 e comportamento semelhante ao observado em T3, porém com maior amplitude de variação ao longo da curva. Os frutos maduros, embora submetidos ao sachê absorvedor de etileno, já apresentavam metabolismo mais ativo no início do armazenamento, condição que favorece maior intensidade respiratória e maiores perdas de água. Dessa forma, a eficiência do controle do etileno tende a ser reduzida quando os frutos já se encontram em estádios avançados de amadurecimento.

O tratamento T2 apresentou R^2 de 0,875 e comportamento intermediário entre T1 e T3. As oscilações observadas sugerem que a refrigeração associada ao sachê absorvedor contribuiu para reduzir as perdas de massa, embora em intensidade inferior à observada nos frutos inicialmente verdes. Esse resultado indica que o estádio fisiológico de colheita exerce influência direta sobre a eficiência das estratégias de conservação pós-colheita.

O tratamento controle apresentou coeficiente de determinação de 0,884 e maior instabilidade ao longo do armazenamento quando comparado aos tratamentos com absorção de etileno. A ausência do sachê favorece a ação do etileno naturalmente produzido pelos frutos, acelerando os processos de amadurecimento, respiração e transpiração. Como consequência, ocorre maior consumo das reservas energéticas e intensificação da perda de água dos tecidos, comprometendo a manutenção da massa fresca.

Sob o ponto de vista fisiológico, os resultados demonstram que a refrigeração associada ao controle do etileno contribuiu para reduzir a intensidade dos processos metabólicos responsáveis pela perda de massa dos frutos. O tratamento T3 destacou-se pela maior estabilidade e conservação da massa fresca, evidenciando que a remoção do etileno é mais eficiente quando aplicada em frutos colhidos em estádios menos avançados de maturação. Dessa forma, a associação entre colheita precoce, refrigeração e uso de sachês absorvedores de etileno constitui uma estratégia promissora para prolongar a vida útil e preservar a qualidade pós-colheita dos frutos.

3.2.4. Firmeza

Para o estudo de fisiologia pós colheita do tomate os resultados obtidos com a análise de firmeza foi a que melhor evidenciou a influência do estádio de maturação sobre a eficiência do sachê absorvedor de etileno. O tratamento T1 apresentou inclinação angular da reta negativo, demonstrando perda contínua da firmeza ao longo do armazenamento. Esse resultado confirma que frutos maduros já apresentam elevada atividade das enzimas hidrolíticas responsáveis pela degradação das pectinas e hemiceluloses da parede celular, reduzindo a capacidade do $KMnO_4$ de interromper o processo de amolecimento.

A firmeza em T1 atingiu aproximadamente 9,0 kg cm^{-2} aos 10 dias, mas reduziu continuamente até cerca de 1,0 kg cm^{-2} aos 18 dias. Os tratamentos T2 e T3 apresentaram queda até o 12º dia, seguida de recuperação, alcançando aproximadamente 10,0 e 10,5 kg cm^{-2}, respectivamente.

A manutenção da firmeza em T2 e T3 demonstra que o $KMnO_4$ foi mais eficiente quando aplicado em frutos menos maduros. Como consequência, ocorre retardamento do amolecimento dos tecidos. Nestes dois tratamentos observou-se uma maior capacidade de preservação da estrutura celular.

Os resultados ligeiramente mais pronunciada em T3, evidenciando que frutos colhidos verdes responderam de forma mais eficiente ao controle do etileno. Nesses frutos, a redução da concentração hormonal retardou a ativação das enzimas pectinolíticas, preservando a integridade das paredes celulares e mantendo a resistência mecânica dos tecidos.

O controle exibiu comportamento semelhante, porém com valores ligeiramente inferiores aos de T2 e T3 ao final do armazenamento. Esse comportamento sugere que parte dos frutos presentes nesse tratamento encontrava-se em estádios menos avançados de maturação, embora a ausência do sequestrador de etileno tenha permitido maior progressão do amadurecimento ao longo do armazenamento.

3.2.5. Análise Conjunta

A análise integrada dos parâmetros demonstra que a eficiência do sachê absorvedor de etileno foi fortemente influenciada pelo estádio de maturação dos tomates. Os frutos maduros (T1) apresentaram resposta limitada à ação do $KMnO_4$, evidenciada pelo aumento dos SST e pela acentuada perda de firmeza. Isso ocorre porque esses frutos já se encontravam próximos ou durante o pico climatérico, fase em que a produção autocatalítica de etileno é elevada.

Por outro lado, os frutos pouco verdes (T2) e principalmente os verdes (T3) apresentaram melhor conservação da qualidade pós-colheita. Nesses tratamentos observou-se maior estabilidade dos SST, menor variação do pH, maior retenção de massa e melhor manutenção da firmeza. Esse comportamento confirma que a remoção precoce do etileno pelo $KMnO_4$ retardou o avanço do amadurecimento, reduzindo a respiração, a degradação das paredes celulares e o consumo de reservas energéticas.

Portanto, os resultados indicam que o uso de sachês absorvedores de etileno à base de permanganato de potássio é mais eficiente quando aplicado em tomates colhidos nos estádios verde e pouco verde, prolongando a vida útil e preservando atributos físico-químicos importantes para a qualidade comercial. Esses resultados concordam com estudos que demonstram menor perda de massa, maior firmeza e retardamento do amadurecimento em frutos climatéricos armazenados na presença de sequestradores de etileno.

3.3. Comparação dos Resultados das condições de Temperatura Ambiente e Temperatura de Refrigeração.

A análise comparativa dos resultados demonstra que a refrigeração foi o principal fator responsável pela preservação da qualidade pós-colheita dos tomates. A redução da temperatura diminuiu a respiração, a transpiração, o consumo de reservas energéticas e a velocidade das reações bioquímicas associadas ao amadurecimento.

Quando associada ao sachê absorvedor de etileno contendo permanganato de potássio, ocorreu um efeito complementar. O $KMnO_4$ atua oxidando o etileno presente no interior das embalagens, convertendo-o em compostos estáveis e reduzindo sua concentração atmosférica. Como consequência, há menor estímulo para a ativação dos genes relacionados ao amadurecimento, à degradação da clorofila, ao amolecimento dos tecidos e à aceleração respiratória.

Enquanto em temperatura ambiente (28,7 °C) os frutos do tratamento controle apresentaram perda de massa estimada em 47,4%, reduzindo de aproximadamente 95 g para 50 g ao final do armazenamento. Sob refrigeração (11 °C) observou-se maior retenção da massa fresca, especialmente nos tratamentos contendo sachês absorvedores de etileno.

Em temperatura ambiente, o tratamento T3 (tomates verdes com $KMnO_4$) apresentou a menor perda de massa, cerca de 4,3%, evidenciando elevada eficiência na conservação dos frutos. Além disso, os SST em ambiente atingiram picos próximos de 5,0 a 5,2 °Brix nos primeiros dias e posteriormente reduziram-se para valores mínimos próximos de 1,2 °Brix no controle.

Já em condições de refrigeração os frutos mantiveram maior estabilidade, com T1 alcançando aproximadamente 6,0 °Brix aos 12 dias e os tratamentos T2 e T3 permanecendo predominantemente entre 3,0 e 5,0 °Brix ao longo do armazenamento.

Quando associada ao sachê absorvedor de etileno contendo permanganato de potássio, ocorreu um efeito complementar. O $KMnO_4$ atua oxidando o etileno presente no interior das embalagens, convertendo-o em compostos estáveis e reduzindo sua concentração atmosférica.

Como consequência, há menor estímulo para a ativação dos genes relacionados ao amadurecimento, à degradação da clorofila, ao amolecimento dos tecidos e à aceleração respiratória. Esse efeito tornou-se particularmente evidente na firmeza dos frutos.

Em temperatura ambiente, o tratamento T2 apresentou a melhor conservação estrutural, mantendo aproximadamente 5,5 kg cm^{-2} ao final do armazenamento, enquanto T3 reduziu para cerca de 2,4 kg cm^{-2}.

Já sob refrigeração, os tratamentos T2 e T3 apresentaram recuperação e manutenção da firmeza, alcançando aproximadamente 10,0 e 10,5 kg cm^{-2}, respectivamente, valores muito superiores aos observados nos frutos maduros (T1), que reduziram de cerca de 9,0 para 1,0 kg cm^{-2} ao final do período experimental.

Os resultados indicam ainda que o estádio de maturação inicial dos frutos influenciou diretamente a eficiência do sistema de conservação. Os tratamentos compostos por tomates pouco verdes (T2) e, principalmente, tomates verdes (T3) apresentaram melhor desempenho tanto em temperatura ambiente quanto sob refrigeração.

Em ambiente, T3 apresentou a menor taxa de perda de massa, muito inferior à observada no controle, enquanto sob refrigeração os frutos verdes apresentaram maior retenção de firmeza e maior estabilidade dos SST. Em contraste, os tomates maduros (T1) responderam de forma mais limitada à ação do $KMnO_4$, pois já se encontravam próximos do pico climatérico.

Esses resultados demonstram que a combinação entre refrigeração e sachês absorvedores de etileno é mais eficiente quando aplicada em frutos colhidos nos estádios verde e pouco verde, prolongando a vida útil comercial e preservando atributos físico-químicos fundamentais para a qualidade pós-colheita do tomate.

4. CONCLUSÃO

É possível concluir que a combinação entre refrigeração e sachês absorvedores de etileno à base de permanganato de potássio constitui uma estratégia eficiente para prolongar a vida útil de tomates, reduzindo perdas quantitativas e qualitativas, preservando a firmeza, minimizando a perda de massa e retardando as transformações bioquímicas associadas ao amadurecimento pós-colheita, resultados compatíveis com a literatura especializada sobre atmosfera modificada e sequestração de etileno em frutos climatéricos.

Desta forma, os sachês de permanganato demonstraram eficácia na absorção do etileno, evidenciada pela mudança da coloração de roxo para um tom amarelo claro. Observou-se que esse efeito foi mais pronunciado em tomates em estágio inicial de maturação (mais verdes), enquanto a eficácia diminuiu em frutos próximos ao estado de bem maduros.

Também é possível concluir e recomendar que a utilização dos sachês de permanganato ocorra preferencialmente em fases iniciais de amadurecimento, a fim de otimizar o controle do etileno e prolongar a vida útil dos tomates.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, C. V. T.; STEFFENS, C. A. Sachês absorvedores de etileno na pós-colheita de maçãs ‘Royal Gala’. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 71-77, mar. 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000100011.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Official methods of analysis of AOAC International*. 22. ed. Rockville: AOAC International, 2023.

BELWAL, P.; BARMAN, K.; KANAUJIA, A.; YADAV, N.; KUSHWAHA, S. Effect of potassium permanganate based ethylene absorbent on shelf life and quality of bitter gourd fruit. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 1080-1089, abr. 2025. DOI: https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i42263.

BRIZZOLARA, S.; MANGANARIS, G. A.; FOTOPOULOS, V.; WATKINS, C. B.; TONUTTI, P. Primary metabolism in fresh fruits during storage. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 11, art. 80, p. 1-16, fev. 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00080.

CERIT, I.; DEMIRKOL, A. The effects of potassium permanganate on postharvest quality and shelf life of climacteric fruits: a review. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 2447-2454, nov. 2020.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. Lavras: ESAL/FAEPE, 1990.

COCETTA, G.; RIVA, M.; CASTELLI, G.; FERRANTE, A. New active packaging to improve the shelf-life and quality of tomato. *Advances in Horticultural Science*, Firenze, v. 34, n. 1S, p. 53-59, 2020. DOI: https://doi.org/10.13128/ahsc-8292.

FANG, Y.; WAKISAKA, M. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies. *Agriculture*, Basel, v. 11, n. 10, art. 992, p. 1-16, out. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture11100992.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *FAOSTAT statistical database*. Rome: FAO, 2022. Disponível em: https://www.fao.org/faostat. Acesso em: 30 maio 2026.

GUTIERREZ-AGUIRRE, B. R.; LLAVE-DAVILA, R. E.; OLIVERA-MONTENEGRO, L. A.; HERRERA-NUÑEZ, E.; MARZANO-BARREDA, L. A. Effect of potassium permanganate as an ethylene scavenger and physicochemical characterization during the shelf life of fresh banana (*Musa paradisiaca*). *International Journal of Food Science*, London, v. 2023, art. 4650023, p. 1-7, ago. 2023. DOI: https://doi.org/10.1155/2023/4650023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: LSPA 2025 – Indicadores IBGE

KAWHENA, T. G.; FAWOLE, O. A.; OPARA, U. L. Modified atmosphere packaging and postharvest quality preservation of fresh produce: a review. *Food Packaging and Shelf Life*, Amsterdam, v. 29, 2021.

WABALI, V. C.; ESIRI, A. Effect of potassium permanganate on colour and texture characteristics of tomato at ambient temperature storage. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 60-62, abr. 2021. DOI: https://doi.org/10.24018/ejfood.2021.3.2.263.

ZAKRIYA, M.; HUSSAIN, A.; MAHDI, A. A.; YASMEEN, F.; KAUSAR, T.; REHMAN, A.; YAQUB, S.; FATIMA, P.; NOREEN, S.; KABIR, K.; NISAR, R.; GORSI, F. I.; FATIMA, H.; KORMA, S. A. Effect of different types of ethylene scavengers used in different combinations on postharvest quality and phytochemicals retention of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, London, v. 10, art. 90, p. 1-15, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s40538-023-00465-w.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos concedidas ao longo da minha caminhada, por me sustentar nos momentos difíceis, renovar minhas forças diante dos desafios e iluminar cada passo dado até aqui. Sem a Sua graça e misericórdia, nada disso seria possível. Conforme escrito em Isaías 41:20: *"Para que todos vejam, e saibam, e considerem, e juntamente entendam que a mão do Senhor fez isso."* Carrego comigo a certeza de que cada conquista alcançada é fruto do cuidado e da providência divina em minha vida.

Aos meus pais, Iran Maria de Souza Nascimento e Ademir Miranda Nascimento Júnior, expresso minha mais profunda gratidão por todo amor, dedicação e esforço incansável realizado para que eu pudesse concretizar meus sonhos. Vocês nunca medem esforços quando o assunto são meus sonhos. Esta conquista também pertence a vocês, que são minha maior inspiração e exemplo de força, coragem e amor incondicional.

Agradeço também aos meus irmãos, Ana Vitória de Souza Nascimento e Joaquim de Souza Nascimento, meus eternos companheiros de vida, que foram essenciais durante toda a minha trajetória e nunca me deixaram só. O apoio, o carinho e a parceria de vocês fizeram toda a diferença nessa caminhada.

Agradeço também aos meus tios, Jorge e Glauciene, que foram uma rede de apoio indispensável durante toda essa trajetória. O carinho, o acolhimento, os conselhos e o incentivo que me deram fizeram toda a diferença nos momentos mais desafiadores. Sem vocês, essa caminhada teria sido muito mais difícil, e certamente eu não teria conseguido chegar tão longe.

Aos meus amigos Amanda Nascimento, Sarah Rodrigues, Maria Vitória Aguiar, Sâmila Teles, Mikael Laurindo, Marliane Oliveira, Mariane Oliveira, Lana Ribas, Marjara Neves, Vinicius Donicci, Layane Ribeiro, Marcos Vinicius Nascimento, Elis Marina, Gabriel Morato, Samila Neres, Priscila Brelaz e Luise Lottici, deixo meu carinho e agradecimento por terem tornado essa caminhada mais leve, feliz e especial.

À minha orientadora, Heloísa, expresso minha sincera gratidão por toda a paciência, dedicação e vontade de ensinar. Sua orientação foi fundamental para a construção deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal. Muito obrigada por nunca me abandonar durante essa trajetória.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal, deixando marcas importantes nesta jornada.