

ENERGIA DE ATIVAÇÃO E ATRIBUTOS DE QUALIDADE DURANTE
O AMADURECIMENTO DO MAMÃO

ANA PAULA DA SILVA COSTA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2024

ENERGIA DE ATIVAÇÃO E ATRIBUTOS DE QUALIDADE DURANTE
O AMADURECIMENTO DO MAMÃO

ANA PAULA DA SILVA COSTA

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal

Orientador: Prof. Jurandi Gonçalves de Oliveira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

C837

Costa, Ana Paula da Silva.

ENERGIA DE ATIVAÇÃO E ATRIBUTOS DE QUALIDADE DURANTE O AMADURECIMENTO DO MAMÃO / Ana Paula da Silva Costa. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

51 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2024.

Orientador: Jurandi Goncalves de Oliveira.

1. Armazenamento em diferentes temperaturas. 2. Conservação em pós-colheita. 3. Energia de ativação. 4. Qualidade do fruto. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

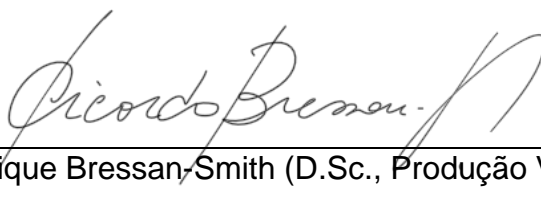
ENERGIA DE ATIVAÇÃO E ATRIBUTOS DE QUALIDADE DURANTE
O AMADURECIMENTO DO MAMÃO

ANA PAULA DA SILVA COSTA

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal

Aprovada em 04 de março de 2024

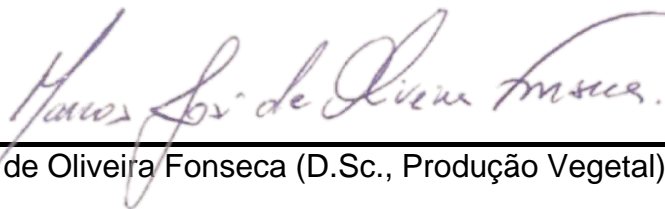
Comissão Examinadora



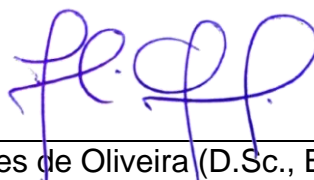
Dr. Ricardo Enríque Bressan-Smith (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF



Dr. Marcelo Gomes da Silva (D.Sc., Física) – UENF



Dr. Marcos José de Oliveira Fonseca (D.Sc., Produção Vegetal) – EMBRAPA



Prof. Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira (D.Sc., Biologia Vegetal) – UENF
(Orientador)

DEDICO

Aos meus avós Maria do Socorro da Silva e Júlio Porfírio da Silva e à minha mãe
Ana Maria Porfírio da Silva (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

A Deus;

A toda a minha família pelo apoio incondicional e por todo o amor e esforço para me oferecer um ótimo estudo e qualidade de vida;

Aos meus irmãos Marcus Aurélio e Jheynife Oliveira por serem minha motivação diária;

Aos meus tios: Raimundo Nonato, Carlos Silva, Antônia Porfírio, Maria das Dores e Alaíde Araújo; e ao meu padrasto Jonhy Oliveira, pelo apoio e incentivo;

Ao meu orientador professor Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira, pela parceria, confiança, ensinamentos, aprendizado, apoio e incentivo nas minhas atividades acadêmicas;

Às minhas amigas de laboratório: Francine Menezes, Isabela Foryta, Glória Hernández e Isabelle Mattos, Rayane Neves; por todo apoio e parceria diária;

Ao meu namorado Gabriel Dias pela paciência e companheirismo;

Ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), pela infraestrutura, oportunidade de cursar o mestrado;

Ao professor Marcelo Gomes da Silva (LCFIS/CCT), pelo apoio e contribuição na construção da pesquisa;

A empresa NortFrut pelo fornecimento dos frutos para o desenvolvimento da pesquisa;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ademais, agradeço a todos que de alguma forma tenham contribuído para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Padrão respiratório do fruto	3
2.2. Alterações fisiológicas na pós-colheita	4
2.2.1. Coloração do fruto	5
2.2.2. Amaciamento da polpa	6
2.2.3. Teor de sólidos solúveis e acidez titulável	7
2.2.4. Tamanho do fruto e perda de massa fresca.....	8
2.3. Temperatura no armazenamento	8
2.4. Equação de Arrhenius	10
3. JUSTIFICATIVA	12
4. OBJETIVOS	14
4.1 Objetivo geral	14
4.2 Objetivos específicos	14
5. MATERIAL E MÉTODOS	15
5.1. Material vegetal e condições de armazenamento.....	15
5.2. Avaliações físicas e químicas.....	16
5.2.1. Perda de massa fresca (PMF)	16
5.2.2. Ângulo <i>hue</i> (<i>hue</i>).....	17
5.2.3. Firmeza do fruto (FF)	17
5.2.4. Integridade das células mesocárpicas (ICM)	17
5.2.5. Acidez titulável (AT)	18
5.2.6. Teor de sólidos solúveis (SS).....	18
5.2.7. Ratio (SS/ATT).....	19
5.3. Cálculo da energia de ativação (E _A)	19
5.4. Análise de dados	19
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20

6.1. Análises físicas e químicas.....	20
6.2. Plot de Arrhenius	31
7. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

RESUMO

COSTA, Ana Paula da Silva; Agrônoma; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2024. Energia de ativação e atributos de qualidade durante o amadurecimento do mamão. Orientador: Prof. D. Sc, Jurandi Gonçalves de Oliveira.

Frutos de origem tropical, de modo geral, são bastante perecíveis, requerendo maior cuidado na conservação em pós-colheita. O fundamento deste trabalho está no estudo da influência da temperatura de armazenamento nas transformações inerentes ao amadurecimento do mamão, de modo a compreender os mecanismos que prolonguem a conservação pós-colheita sem promover danos fisiológicos nos frutos. Os frutos de mamão 'Aliança' foram colhidos no estágio verde-maduro, após sanitização os mesmos foram submetidos ao armazenamento nas temperaturas de 10°C, 12°C, 20°C, 25°C e 30°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) e UR de 80% ($\pm 5\%$). A cada tratamento, um lote de três frutos foi analisado ao chegar no laboratório e periodicamente de acordo com a temperatura de armazenamento. Os parâmetros físicos e químicos avaliados foram: perda de massa fresca (PMF), ângulo *hue* (*hue*), firmeza do fruto (FF), integridade das células mesocárpicas (ICM), acidez titulável (AT), teor de sólidos solúveis (SS), ratio (SS/AT) e a energia de ativação (E_A). As temperaturas de 20°C, 25°C e 30°C influenciaram de forma semelhante na FF, na ICM e no *hue*. Por outro lado, a PMF foi influenciada de maneira semelhante nos frutos armazenados nas temperaturas de 20°C e 10°C. O armazenamento dos frutos a

10°C inibiu e retardou as transformações qualitativas envolvidas no processo de amadurecimento do mamão. A ICM do fruto foi o processo que demandou maior E_A . A ICM e a PMF foram as variáveis de qualidade que apresentaram o melhor ajuste no plot de Arrhenius. Por meio da E_A é possível prever a dependência das transformações inerentes ao amadurecimento que estão relacionadas à qualidade dos frutos e à temperatura, além disso determinar quais características de qualidade são mais susceptíveis às transformações em função da temperatura de armazenamento.

Palavras-chave: armazenamento em diferentes temperaturas, conservação em pós-colheita, energia de ativação, qualidade de fruto.

ABSTRACT

COSTA, Ana Paula da Silva, Agronomist; North Fluminense State University Darcy Ribeiro. March, 2024. Activation energy and quality attributes during papaya ripening. Advisor: Prof. Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira.

Tropical fruits, in general, are highly perishable and require greater care in post-harvest preservation. This work is based on studying the influence of storage temperature to understand the mechanisms that extend post-harvest preservation without causing physiological damage to the fruits. 'Aliança' papaya fruits were harvested at the green-ripe stage, sanitized, and stored at temperatures of 10°C, 12°C, 20°C, 25°C, and 30°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) with a relative humidity of 80% ($\pm 5\%$). For each treatment, a batch of three fruits was analyzed upon arrival at the laboratory and periodically according to the storage temperature. The evaluated physical and chemical parameters included: fresh mass loss (FML), *hue* angle (*hue*), fruit firmness (FF), mesocarp cell integrity (MCI), total acidity (TA), soluble solids (SS), (SS/AT ratio), and activation energy (E_A). The temperatures of 20°C, 25°C, and 30°C similarly influenced FF, MCI, and *hue*. However, FML was similarly affected in fruits stored at 20°C and 10°C. Storing fruits at 10°C inhibited and delayed the qualitative transformations involved in the ripening process of papaya. MCI required the highest E_A . Both MCI and FML showed the best fit in the Arrhenius plot. By analyzing E_A , it is possible to predict the dependence of ripening-related transformations on fruit quality and temperature, as well as determine which quality characteristics are most susceptible to temperature-related changes during storage.

Keywords: activation energy, fruit quality, post-harvest preservation, storage at different temperatures.

1. INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de frutos e hortaliças frescas impulsionou a demanda comercial para melhorar as condições de armazenamento pós-colheita destes produtos (Campagnoli, 2022). Frutos são produtos perecíveis que se deterioram muito rapidamente devido à sua intensa atividade metabólica, a qual é bastante influenciada pelo ambiente onde os mesmos se encontram. Para atrasar a senescência e prolongar a vida-útil de produtos perecíveis, os mesmos devem ser manipulados e armazenados de maneira adequada, sempre mantendo a qualidade para o consumo in natura, ou para o processamento dos mesmos (Sun et al., 2019).

Os frutos, de modo geral, podem exibir dois padrões diferentes de respiração, assim sendo denominados de climatéricos ou não climatéricos. O mamão, por exemplo, é considerado um fruto climatérico, pois apresenta um aumento acentuado na atividade respiratória e produção de etileno (C_2H_4) durante a fase de amadurecimento, tornando-o altamente perecível (Oliveira e Filho, 2021). A intensidade respiratória dos frutos sofre grande influência da temperatura, a qual são acondicionados, uma vez que são organismos metabolicamente ativos (Brackman et al., 2004).

O controle da temperatura e umidade relativa são alguns dos principais fatores do ambiente que, quando em níveis adequados, contribuem para a manutenção da qualidade dos frutos durante o armazenamento e transporte

(Samira et al., 2011). A refrigeração é um dos métodos mais utilizados para a manutenção da qualidade dos produtos de origem vegetal, pois retarda a taxa metabólica do produto através da redução da atividade respiratória, atrasando a senescência do órgão. A senescência do tecido vegetal conduz à perda dos atributos de qualidade, tais como sabor, aroma, textura, cor, teor de umidade e outros fatores associados à sua palatabilidade (Chitarra e Chitarra, 2005). A refrigeração permite o transporte e comercialização do fruto para mercados mais distantes, além de inibir o desenvolvimento de micro-organismos (Fonseca et al., 2003).

A compreensão da fisiologia pós-colheita do mamão contribuirá para o desenvolvimento e uso de tecnologias para o manejo pós-colheita, aplicando boas práticas a fim de garantir a manutenção da qualidade do fruto até o consumidor com a redução das perdas após a colheita (Oliveira e Filho, 2021). Em vista disso, esse trabalho objetiva investigar o efeito da temperatura no amadurecimento do mamão, de forma a contribuir para o desenvolvimento de tecnologia e manejo que preservem a qualidade dos frutos frescos durante o seu armazenamento

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Padrão respiratório do fruto

A vida útil e qualidade pós-colheita do fruto são influenciadas pela velocidade das reações metabólicas que acontecem nas células durante o desenvolvimento do mesmo. A respiração disponibiliza energia na forma de ATP, a partir da oxidação de componentes orgânicos em moléculas simples como o CO₂ e a redução do O₂ a H₂O. A disponibilização de energia de maneira controlada pela respiração será usada para impulsionar as reações metabólicas celulares. Paralelamente à disponibilização de energia, a respiração também é responsável por gerar precursores de carbono que são matéria-prima usada como substrato para diversas reações (Taiz et al., 2017; Yahia e Carrillo-López, 2019).

De modo geral, a taxa respiratória do fruto muda de acordo com o desenvolvimento do órgão e condições ambiente com destaque para a temperatura e concentração de O₂ (Yahia e Carrillo-López, 2019). Os frutos são classificados em dois grupos de acordo com o padrão respiratório. Quando há um aumento da respiração no início do amadurecimento os frutos são denominados de climatéricos, se a respiração for constante em toda a fase de maturação, o fruto é classificado como não climatérico (Tolentino et al., 2018; Gadelha et al., 2024). De modo geral, o aumento na respiração no início do amadurecimento é acompanhado do aumento na produção de etileno nos frutos climatéricos (Zhang et al., 2020).

A intensidade e o tempo de ocorrência da atividade respiratória máxima variam de acordo com a espécie vegetal e ainda podem variar entre cultivares (Krongyut et al., 2011). O aumento respiratório pode coincidir ou não com o aumento da produção de etileno em frutos climatéricos (Taiz et al., 2017). O mamão é um fruto com padrão respiratório do tipo climatérico (Rodrigues et al., 2021). Quando colhido no estágio verde, fisiologicamente maduro, o fruto passa por um aumento da taxa respiratória e na emissão de etileno, o que modula mudanças intensas na fase de amadurecimento (Li et al., 2013). No mamão o pico respiratório é coincidente com o pico na emissão de etileno (Ong et al., 2013).

A vida útil dos frutos está inversamente relacionada à intensidade da respiração, quanto maior a taxa respiratória menor a vida útil do tecido. Sob condições não controladas de armazenamento a aceleração do processo respiratório pode antecipar a senescência do fruto (Silva e Ferrari, 2011). Em condições de temperatura ambiente, o ciclo de amadurecimento do mamão se completa em poucos dias, caracterizando-o como um fruto bastante perecível e de vida curta na fase pós-colheita (Morais et al., 2010). Desse modo, é fundamental o controle do amadurecimento desses frutos, para que haja o aumento da vida útil pós-colheita, de modo a possibilitar a competitividade e atendimento a mercados mais distantes (Barbosa, 2013).

2.2. Alterações fisiológicas na pós-colheita

Após a colheita, o aporte de fotoassimilados para os frutos se encerra e não conseguem absorver água e minerais para o seu desenvolvimento, tornando a respiração o principal processo fisiológico responsável por dar suporte à biossíntese e degradação catalisados por enzimas e estruturas moleculares essenciais para o amadurecimento. Os frutos passam por diferentes fases durante o seu desenvolvimento, sendo elas: crescimento, maturação, amadurecimento e senescência (Chitara e Chitarra, 2005; Barbosa, 2013). O mamão por ser climatérico, quando colhido maduro fisiologicamente, completa seu desenvolvimento após a colheita, ocorrendo o aumento da atividade respiratória e da emissão de etileno. Isto faz do mamão um fruto de vida curta, que completa seu desenvolvimento em poucos dias após a colheita quando em temperatura ambiente (Morais et al., 2010).

O desenvolvimento do fruto é um processo coordenado de eventos bioquímicos, que conferem mudanças na cor, firmeza da polpa, acumulação de açúcares, produção de compostos aromáticos e ácidos orgânicos (Brumos, 2021). A senescência é parte do processo de desenvolvimento do fruto, sendo caracterizada pela redução na resistência do tecido ao estresse oxidativo, perda de contenção das membranas celulares e predominância de processos degenerativos, responsáveis pelo envelhecimento e morte do tecido vegetal (Lqbal et al., 2017).

A velocidade das transformações que acontecem no processo de amadurecimento do fruto é dependente de fatores como genótipo e condições do ambiente que interferem na taxa respiratória e emissão de etileno, assim como nas transformações físicas e químicas relacionadas a essa fase do desenvolvimento do órgão (Souza et al., 2014). Nem sempre as transformações inerentes ao amadurecimento acontecem na mesma velocidade. Por exemplo, durante o amadurecimento do mamão, nem sempre a perda de firmeza e a mudança de coloração da casca do fruto ocorrem simultaneamente, sendo bastante influenciadas pelas condições ambiente de pré e pós-colheita (Oliveira e Filho, 2021).

2.2.1. Coloração do fruto

Durante o amadurecimento, os frutos mudam sua coloração do verde para um espectro de cores, que abrange o vermelho, laranja, amarelo, roxo e azul (Mota et al., 2015). Geralmente uma gama de pigmentos estão presentes nos frutos, sendo cada um desses com uma cor específica. As clorofilas conferem coloração verde, enquanto as cores amarelo, laranja e vermelho, ocorrem devido à presença de carotenoides, o vermelho, azul e violeta, são devido às antocianinas e o amarelo, aos flavonoides (Choo, 2018).

Os frutos perdem a coloração verde devido à degradação da clorofila (Gorfer et al., 2022). O mamão pode ser classificado pela coloração da casca nos diferentes estádios de maturação, sendo separados em 5 subgrupos. Os frutos do subgrupo 1, são frutos “amadurecendo” que possuem até 15% da superfície da casca amarelada; o subgrupo 2, são frutos “ $\frac{1}{4}$ maduros” que possuem de 15% a 25% da superfície da casca amarelada; o subgrupo 3, são frutos “ $\frac{1}{2}$ maduros” que possuem de 25% a 50% da superfície da casca amarelada; o subgrupo 4, são frutos “ $\frac{3}{4}$

maduros”, que possuem de 50% a 75% de amarelecimento na superfície da casca; e o subgrupo 5 são os frutos “maduros” que possuem acima de 75 % da superfície da casca amarelada (CEAGESP, 2003).

A cor do mamão maduro, geralmente, varia entre as tonalidades do amarelo e vermelho, podendo apresentar cores mais claras ou mais intensas. A mudança de coloração inicia-se na região distal (cicatriz do estigma) e evolui até a direção proximal (pedúnculo) (Oliveira e Filho, 2021). A colorimetria é usada para aferir a coloração dos frutos nos estudos em pós-colheita. Em mamões submetidos à injúria mecânica por abrasão, a região afetada apresentou coloração escurecida e acelerado amarelecimento (Godoy et al., 2010). Foram identificados compostos com atividade provitamina A em mamões de polpa vermelha e alaranjada do grupo Solo e Formosa, produzidos nos estados do Rio de Janeiro, Bahia e São Paulo (Rodrigues-Amaya, 1996).

Os frutos devem ser colhidos de acordo com a coloração da casca, levando em consideração a época do ano e a distância do mercado consumidor. Durante os anos em que as médias de temperatura são baixas, o tempo necessário para a completa maturação é prolongado, portanto, para um teor satisfatório de açúcares os frutos devem ser colhidos com a casca mais amarela em relação àqueles colhidos no verão. Frutos colhidos com a coloração mudando para a amarela apresentam padrão adequado de qualidade organoléptica quando maduros e vida-útil pós-colheita prolongada, quando manejados corretamente (Martins e Costa, 2003).

2.2.2. Amaciamento da polpa

Durante o amadurecimento do fruto, a firmeza da polpa sofre alterações devido às modificações dos constituintes da parede celular, tornando-a mais macia e atraente para a dispersão das sementes (Johnson et al., 2017). Um conjunto de genes específicos relacionados à textura confere aos frutos suas texturas exclusivas, que podem ser quebradiças, farináceas ou pastosas (Contador et al., 2015). As mudanças na textura são resultadas da ação sinérgica de um conjunto de enzimas de degradação de parede. Após a colheita do fruto a redução da firmeza da polpa ocorre de forma gradativa (Wang e Seymour, 2022).

Embora a composição da parede celular dos tecidos dos frutos varie com o estágio de desenvolvimento e com a espécie, de modo geral, ela pode ser definida como uma mistura de microfibrilas de celulose semirrígidas, ligadas por uma rede de xiloglucanos, incorporadas em uma fase de matriz péctica gelatinosa hidratada, contendo polissacarídeos não celulósicos (hemiceluloses, pectinas, glicoproteínas e, em alguns tipos celulares diferenciados, lignina) (Johnson et al., 2017; Posé et al., 2019).

O amolecimento da polpa do fruto é resultante do aumento da atividade das pectinases, em especial a poligalacturonase e a pectinametilesterase, que atuam alterando a parede celular e ocasionando mudanças significativas na integridade das membranas celulares do tecido mesocárpico. Essas enzimas são responsáveis pela diminuição da firmeza do fruto de 20 a 30 vezes (Jacomino et al., 2003; Azevedo et al., 2008).

A firmeza do fruto deve ser levada em consideração para um melhor manuseio na pós-colheita. O amolecimento excessivo dos frutos ocasiona perdas econômicas, devido à suscetibilidade a injúrias mecânicas, dificultando o transporte, tempo de armazenamento e reduzindo a vida útil (Johnson et al., 2017).

2.2.3. Teor de sólidos solúveis e acidez titulável

Os frutos carnosos passam por alterações que o tornam mais palatáveis para o consumo. Entre essas alterações há mudanças químicas que resultam em alterações em teores de açúcares, ácidos e liberações de compostos voláteis (Chitarra e Chitarra, 2005; Barrangán-Iglesias et al., 2018). O teor de sólidos solúveis expresso em °Brix, representa os açúcares solúveis, aminoácidos e ácidos orgânicos que influenciam o rendimento industrial (Giordano et al., 2000). Em mamão os teores de açúcares não mudam durante o amadurecimento do fruto, pois esses não acumulam amido para ser hidrolisado após a colheita. Os principais açúcares presentes nos frutos são a frutose, sacarose e glicose (Chitarra e Chitarra, 2005).

A acidez titulável no mamão é dada pela predominância do ácido cítrico, que é o ácido orgânico mais abundante na polpa do mamão maduro, influenciando no sabor do fruto (Giordano et al., 2000). O mamão possui pH relativamente alto, quando comparado a outros frutos, em torno de 5,0 a 5,9 devido à sua baixa acidez,

que pode variar entre 0,04% e 0,14%. Os principais ácidos orgânicos presentes no fruto são o fumárico, cítrico e o málico (Kelebek et al., 2015; Reis et al., 2015).

O sabor do fruto pode ser representado com maior acurácia pelo ratio que representa a relação entre a quantidade de açúcar e teor de ácidos orgânicos, sendo obtida pela razão entre o teor de sólidos solúveis e a acidez titulável. Assim, os principais fatores que influenciam o sabor do fruto, sendo eles ambientais ou fisiológicos são levados em consideração (Moreira, 2004).

2.2.4. Tamanho do fruto e perda de massa fresca

O tamanho do fruto é uma característica importante quando se leva em consideração a exportação, pois existem exigências específicas dentro do padrão de qualidade, que variam entre os países importadores (Martins e Costa, 2003). A perda de água por transpiração dos frutos armazenados representa a perda de massa fresca e determina as perdas quantitativas e qualitativas do produto, pois influencia na qualidade ao alterar a aparência e a textura (Azevedo et al., 2011).

2.3. Temperatura no armazenamento

Após a colheita, a capacidade de conservação dos frutos é diretamente proporcional à capacidade de remoção do calor do produto. O calor que deve ser removido dos frutos é composto pelo calor do campo (devido à alta temperatura quando colhido) e pelo calor das reações metabólicas (respiração celular contínua). O calor pode ser removido por diferentes métodos, que são intrínsecos a determinada espécie, de acordo com a tolerância do material à umidade e ao frio. O calor pode ser removido pela circulação de ar frio ao redor do fruto, quando condicionados em salas de refrigeração ou resfriamento forçado; pela água no processo de hidrorresfriamento; por gelo em contato com a mercadoria ou pelo resfriamento a vácuo (Yahia e Carrillo-López, 2019).

A temperatura de armazenamento do produto tem grande importância na determinação da taxa metabólica, pois em altas temperaturas a taxa metabólica é acelerada e aumenta o processo de amadurecimento e deterioração do fruto (Chitarra e Chitarra, 2005). A temperatura e o teor de água nos produtos armazenados são os principais responsáveis pela sua vida útil. Pois, quando os frutos são armazenados em condições inadequadas, há um aumento da taxa

respiratória, o que causa a aceleração nas reações de síntese e degradação de compostos e deterioração (Zuchi et al., 2011).

O estresse térmico afeta negativamente o metabolismo vegetal devido ao seu impacto diferencial na estabilidade proteica e nas reações enzimáticas (Khaliq et al., 2023). O que resulta no desacoplamento de diferentes reações e a acumulação de intermediários tóxicos e espécies reativas de oxigênio (ERO). O estresse térmico causado pelo calor aumenta a fluidez das membranas, enquanto o estresse causado pelo frio reduz essa fluidez (Valenzuela et al., 2017). Além disso, calor e frio podem impactar a estabilidade ou desintegração de estruturas secundárias de DNA e RNA, interrompendo a transcrição, tradução ou processamento e reciclagem (turnover) de RNA. Adicionalmente, o estresse térmico pode bloquear a degradação de proteínas, fortalecendo a formação de agregados proteicos (Ahmad et al. 2010).

Por outro lado, o abaixamento da temperatura, quando em níveis ótimos, aumenta a vida útil dos frutos, pois, reduz a respiração e transpiração, o desenvolvimento de podridões, e a produção de etileno. Aliás, nos frutos de respiração climatérica, retarda o pico climatérico, logo, o seu amadurecimento e a senescência. De modo geral, para cada redução de temperatura de 10°C, na faixa entre 5°C e 25°C, a taxa de respiração é reduzida pela metade, e a vida útil é dobrada. Esse nível de redução é conhecido como tendo um quociente respiratório (Q10) de 2. Contudo, os valores de Q10 variam entre as espécies vegetais, durante seu desenvolvimento e armazenamento, e, para diferentes intervalos de temperatura (Kerbaudy, 2008; Yahia e Carrillo-López, 2019).

As frutas tropicais são sensíveis ao frio, o que pode ocasionar uma série de danos e características indesejáveis, como a suscetibilidade a patógenos, incapacidade de completo amadurecimento, escurecimento da casca e/ou da polpa afetando a aparência, o sabor e a vida útil do produto. O mamão apresenta boa resposta ao armazenamento refrigerado, entretanto, não tolera o armazenamento em temperaturas muito baixas, que podem ocasionar bloqueio no amadurecimento e danos pelo frio (denominado de "*chilling*"), comprometendo a qualidade do fruto (Oliveira e Filho, 2021).

A susceptibilidade do mamão à baixa temperatura varia de acordo com o estágio de desenvolvimento do fruto quando submetido à temperatura de

armazenamento. O mamão quando maduro pode ser armazenado sob temperatura de 7°C a 8°C, desde que a duração de armazenamento não exceda 21 dias. Porém, não é muito comum, comercialmente, o manejo do mamão maduro. Em linhas gerais, a faixa de temperatura recomendada para a preservação do mamão é de 7°C a 13°C (Paul e Oliveira, 2020). É importante ressaltar que o atraso no processo de resfriamento, mesmo que seja apenas por algumas horas, pode causar uma redução significativa na vida útil de culturas que têm um metabolismo respiratório rápido (Jacomino et al. 2003; Yahia e Carrillo-López, 2019).

Vale enfatizar que o armazenamento sob baixa temperatura somente é eficaz na conservação do mamão, quando o fruto está sob essas condições. Após sair da condição de resfriamento, o processo de amadurecimento muitas vezes é acelerado, ocasionando rápida conversão da cor verde da casca do fruto em amarelo e diminuição da consistência da polpa (Souza et al., 2009). Do mesmo modo, em armazenamentos mais prolongados, ocorre acentuada perda de firmeza da polpa. Os principais problemas que ocorrem durante a refrigeração são: ocorrência de distúrbios fisiológicos e incidência de podridões (Pan et al., 2019; Khaliq et al., 2023).

Durante o armazenamento do fruto a umidade ideal deve estar na faixa de 75% a 95%. Abaixo desses percentuais, o padrão de qualidade do fruto pode decair, pois, a casca além de se tornar enrugada, pode apresentar perda de brilho, e a polpa perde a sua consistência (Geeta e Anagha, 2023). Quando são armazenados com umidade acima de 95%, o desenvolvimento de fungos que causam o apodrecimento rápido dos frutos é favorecido (Martins e Costa, 2003).

2.4. Equação de Arrhenius

A respiração como processo bioquímico é influenciada pela temperatura (Wu et al., 2019). Contudo, devido à plasticidade das plantas, as mesmas conseguem ajustar a respiração dentro de certos limites para se ajustarem à temperatura ambiente. Desse modo, é importante explorar o potencial das plantas em se aclimatarem às mudanças nas condições ambiente (Atkin et al., 2005). De modo geral, à medida que a temperatura aumenta o consumo de O₂ se eleva (Plasquy et

al., 2021), por outro lado a baixa temperatura desacelera a respiração e a produção de etileno e reduz o crescimento de patógenos e a perda de água (Heyes, 2018).

As enzimas são proteínas altamente especializadas, que catalisam reações químicas em soluções aquosas sob condições limitantes de temperatura e pH. Durante a ação das enzimas há a conversão de substratos elementares em macromoléculas biológicas com a conservação e transformação da energia química. Durante a evolução, as enzimas se desenvolveram para diminuir de forma seletiva a energia de ativação (E_A) das reações necessárias para a manutenção da vida celular (Nelson e Cox, 2014).

A função de Arrhenius ilustra o efeito da temperatura e da energia de ativação na taxa de ocorrência de uma reação química (Garavito et al., 2021). Através da função de Arrhenius é possível obter a E_A , que é dependente da temperatura, e determinar quanto a capacidade térmica está associada às reações catalisadas por enzimas. Essa mudança na capacidade térmica gera dados, que preveem diretamente uma temperatura ótima para reações metabólicas acionadas por enzimas (Schipper et al., 2014).

A energia de ativação é uma barreira energética sobre a qual os reagentes devem 'saltar' para se transformar em produto, a velocidade de determinada reação é tanto menor quanto maior for a barreira para ocorrência desta reação (Nelson e Cox, 2014). Essa transformação geralmente envolve a quebra e/ou formações de ligações químicas. Se a barreira à quebra ou criação de ligações for alta, a taxa será lenta e, inversamente, se a barreira for baixa, a taxa será alta. A relação exponencial entre a taxa e a E_A significa que pequenas alterações na E_A resultam em grandes alterações na taxa. A temperatura também está incluída no termo exponencial e, portanto, aumentos lineares na temperatura levam a aumentos exponenciais na taxa (Schipper et al., 2014).

A equação de Arrhenius é utilizada para a modelagem de diversos processos biológicos vegetais, como a respiração, transpiração, atividade de água (Garavito et al., 2022) e para a previsão de acúmulo de etileno em embalagens de frutos (Sonawane, 2024). As taxas calculadas podem otimizar o manejo da cultura com mudanças nas condições da atmosfera de armazenamento e fornecer informações valiosas para a compreensão, previsão e controle das mudanças na qualidade dos alimentos

3. JUSTIFICATIVA

O mamão é considerado a cultura frutífera mais preferida em regiões tropicais e semitropicais, desempenhando um papel economicamente significativo no mercado mundial. Sua produção é amplamente disseminada, com área de cultivo e produção mundial que excedem 486 mil ha e 14,1 mil toneladas, respectivamente (FAO, 2022). Em 2022, o Brasil foi o terceiro maior produtor e exportador mundial de mamão, sendo uma fruta cultivada em praticamente todos os Estados brasileiros (FAOSTAT, 2024). A produção nacional de mamão no ano de 2022 foi de 1,1 milhão de toneladas e 26.431 ha de área colhida (IBGE, 2024).

Contudo, frutos de origem tropical, de modo geral, são bastante perecíveis, requerendo maior cuidado na conservação em pós-colheita (Parven et al., 2020). O fruto do mamão é de perecibilidade alta quando acondicionado em temperatura ambiente, por ser uma fruta climatérica apresenta amadurecimento acelerado pós-colheita, o que resulta em deterioração significativa da qualidade nutricional e perdas financeiras em toda a sua cadeia de abastecimento (Mo et al., 2022; Zhang et al., 2020). Devido a isso, cerca de 40-60% de sua produção vai para o lixo por diversos motivos, como manuseio incorreto, doenças pós-colheita, armazenamento, embalagem e transporte inadequados (Prasad e Paul, 2021).

O armazenamento sob baixa temperatura é uma estratégia de manejo pós-colheita utilizado para prolongar a vida útil de frutos e outros produtos de origem vegetal, devido à redução na taxa de metabolismo, e em especial na atividade

respiratória (Tao e Pan, 2023). A temperatura ideal de armazenamento, aquela que potencialmente prolongue a conservação pós-colheita sem promover danos fisiológicos nos frutos, é muito variável (Wan e Huang, 2023).

As falhas no manejo e conservação na fase de pós-colheita são uma das principais causas para as perdas de frutos. Buscando reduzir tais perdas, o fundamento do presente trabalho está no estudo da influência da temperatura de armazenamento, de modo a compreender os mecanismos que prolonguem a conservação pós-colheita sem promover danos fisiológicos nos frutos.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Acompanhar o amadurecimento do mamão e as transformações físicas e químicas que ocorrem durante o armazenamento sob condições controladas e diferentes temperaturas e realizar o plot de Arrhenius.

4.2 Objetivos específicos

- Avaliar as transformações físicas e químicas em frutos durante o armazenamento sob diferentes temperaturas;
- Realizar o plot de Arrhenius para determinar a EA das transformações físicas e químicas durante a pós-colheita do mamão;
- Avaliar a partir da EA as alterações relacionadas com o amadurecimento do fruto armazenado em diferentes temperaturas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Material vegetal e condições de armazenamento

O experimento foi realizado na Unidade de Bioquímica e Fisiologia Vegetal Pós-colheita do Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Os frutos, doados gentilmente pela empresa NorteFrut (Pinheiros, ES), no estágio verde-maduro, foram transportados de caminhão até a cidade de Campos dos Goytacazes, a cerca de 500 km de distância da área de produção. Foram realizadas colheitas de 5 lotes, um para cada tratamento, em diferentes épocas do ano, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Datas das colheitas dos diferentes lotes de mamão utilizados para o armazenamento sob diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Datas de colheita (dd/mm/aa)
12	22/03/23
25	04/05/23
30	26/05/23
20	30/06/23

10	21/09/23
----	----------

No laboratório os frutos foram sanitizados com solução aquosa de NaClO 10%, identificados numericamente e armazenados em câmara frigorífica com volume aproximado de 4,95 m³ e dispostos em prateleira de metal, no ambiente não possuía expurgo de etileno. Os frutos foram armazenados em temperaturas de 10°C, 12°C, 20°C, 25°C e 30°C \pm 2°C e UR de 80% \pm 5%. Para cada análise foi utilizado um lote de três frutos, a cada tratamento, um lote foi analisado ao chegar no laboratório e periodicamente os lotes foram analisados de acordo com a temperatura de armazenamento, conforme descrito a seguir:

- Frutos armazenados a 10°C: amostrados aos 0, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 36 e 40 dias de armazenamento; a partir do 40º dia de armazenamento os frutos foram submetidos à temperatura de 20°C e amostrados aos 41, 43 e 45 dias de armazenamento;
- Frutos armazenados a 12°C: amostrados aos 0, 2, 4, 8, 14, 26 e 34 dias de armazenamento;
- Frutos armazenados a 20°C: amostrados aos 0, 2, 4, 8, 14 e 16 dias de armazenamento;
- Frutos armazenados a 25°C: amostrados aos 0, 2, 4, 8, 14 e 16 dias de armazenamento;
- Frutos armazenados a 30°C: amostrados aos dias 0, 2, 4, 8 e 14 dias de armazenamento.

5.2. Avaliações físicas e químicas

5.2.1. Perda de massa fresca (PMF)

A massa fresca foi obtida por meio da pesagem dos frutos com o auxílio de uma balança eletrônica (modelo BL3200H, 0,01 g, Shimadzu). A PMF dos frutos foi obtida por meio das pesagens dos frutos, periodicamente de acordo com a temperatura de armazenamento. A diferença entre a massa inicial (P_{inicial}) e final (P_{no dia da avaliação}) do fruto foi considerada como PMF total durante cada intervalo de armazenamento e calculada como percentagem com base na massa fresca inicial. O cálculo da PMF foi realizado aplicando-se a equação 1, os resultados obtidos são expressos em percentagem.

$$PMF = \left[\frac{(P_{inicial} - P_{no\ dia\ da\ avaliação})}{P_{inicial}} \right] \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

5.2.2. Ângulo *hue* (*hue*)

As medições da coloração da casca foram realizadas utilizando-se um colorímetro portátil (Chroma Meter, modelo CR-400, Minolta). Foram realizadas três leituras em pontos equidistantes, na região equatorial do fruto, utilizando-se o valor médio para os seguintes atributos de cor, segundo as coordenadas CIELab: 1) luminosidade: parâmetro L; 2) cromaticidade: coordenadas a e b, 3) Cromo: $[(a^2 + b^2)^{1/2}] = C^*$ e 4) ângulo *hue*. As coordenadas de cor L, a, b, C e o ângulo *hue* seguiram a descrição de McGuire (1992).

5.2.3. Firmeza do fruto (FF)

A firmeza do fruto foi obtida por meio da resistência dos frutos à penetração, utilizando um texturômetro digital (Texture analyser, modelo TA.XT Express, UK), com sonda de 2 milímetros de diâmetro. A velocidade de penetração da sonda nos frutos foi de 1 mm s⁻¹, sendo registrados os valores quando a sonda detectou resistência igual a 0,1 Newton. Foram efetuadas três medições em cada fruto, sempre na região equatorial, utilizando-se o valor médio. Os testes foram conduzidos com o fruto intacto, sem a retirada da casca, até a profundidade de 1 cm, com o registro da maior força durante a penetração e os resultados expressos em Newton.

5.2.4. Integridade das células mesocárpicas (ICM)

A integridade das células mesocárpicas (ICM) foi determinada através da coleta de cinco amostras cilíndricas (10 mm × 10 mm) do mesocarpo do fruto, para medir o vazamento de eletrólitos, essencialmente conforme descrito por Vasquez-Tello et al. (1990). As amostras foram coletadas da região equatorial do fruto e enxaguadas em água deionizada por 10 segundos, após o enxágue as amostras foram imersas em 30 mL de água ultrapura e mantidas a 12°C por 24 horas. Os eletrólitos livres (EL) da solução resultante foram determinados pelo medidor de condutividade (Conduvímetero, modelo CD-820, Instruterm). As amostras foram

aquecidas a 80°C por 1 h, seguidas por 16 h a 12°C para obter as concentrações eletrolíticas totais (ET). Todas as medições de condutividade foram realizadas em temperatura ambiente (25°C). A integridade das células foi calculada aplicando a equação 2 e os dados expressos em percentagem.

$$ICM = \left[1 - \frac{EL}{ET}\right] * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

5.2.5. Acidez titulável (AT)

A acidez titulável (AT) foi determinada por titulação com NaOH a 0,1 M, utilizando o método da A.O.A.C. (1975), empregando uma bureta volumétrica de 50 mL, auxiliado por um pHmetro digital de bancada (PHMETER, modelo PH-140, Simpla). Devido a polpa do mamão possuir coloração vermelha, que interfere com a cor rósea indicada pela fenolftaleína, foi utilizado o valor de pH 8,2 (ponto de virada da fenolftaleína) para determinar o ponto final da titulação, englobando uma faixa de pH de 8,2 até 8,3. Para isso, foi retirada uma amostra da polpa do fruto de 15 g, a qual foi transferida para um Becker (200 mL), sendo o volume completado para 50 mL com água deionizada. Com o uso de um homogeneizador (Turratec TE 102) a uma rotação de 1.800 RPM, a amostra foi homogeneizada por cerca de 30 segundos.

$$AT (\% \text{ ácido cítrico}) = \frac{(V * N * P' * 100)}{P} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que V é o volume de NaOH gasto na titulação (mL); N é a normalidade corrigida do NaOH; P' é o valor miliequivalente do ácido cítrico (0,064) e P é o volume da amostra (mL). Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido cítrico.

5.2.6. Teor de sólidos solúveis (SS)

A determinação do teor de sólidos solúveis (SS) foi feita por leitura em refratômetro, a partir do exsudato do tecido da polpa sobre a superfície do prisma, utilizando refratômetro portátil digital (Refractometer, modelo HI96801, Hanna) e os

resultados foram expressos em °Brix. Periodicamente, antes da leitura da amostra, o refratômetro era calibrado com água destilada.

5.2.7. Ratio (SS/ATT)

A relação entre o teor de sólidos solúveis e a acidez titulável foi obtida pela divisão entre os resultados médios dos teores de sólidos solúveis totais e das médias de acidez titulável.

5.3. Cálculo da energia de ativação (E_A)

A energia de ativação (E_A) para a taxa de uma reação química ocorrendo em função da temperatura (T) é dada pela inclinação do gráfico exponencial, com constante K em função do inverso da temperatura absoluta (Feng et al., 1990). Através do plot de Arrhenius é possível obter informações sobre a cinética das reações, incluindo como a temperatura afeta a rapidez com que as reações ocorrem e a energia mínima necessária. A E_A foi determinada a partir da equação de Arrhenius, descrita a seguir:

$$K' = K_a e^{\frac{-E_A}{RT}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que K' é a constante para uma temperatura; K_a é a constante de taxa máxima; T é a temperatura absoluta (em K); E_A é a energia de ativação para a reação expressa em kJmol⁻¹; R é a constante universal dos gases (8,314 k⁻¹mol⁻¹).

5.4. Análise de dados

Todas as análises foram realizadas em triplicata. Os dados experimentais foram processados utilizando os *softwares* Phyton e Origin.85exe, nos quais foram calculadas as médias de 3 frutos e o erro padrão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Análises físicas e químicas

A PMF dos frutos foi crescente ao longo do período de armazenamento, independente da temperatura utilizada (Figura 1). O armazenamento dos frutos a 25°C e 30°C acelerou a PMF, registrando valores da ordem de 8,4% e 8,5%, respectivamente, entre os dias 14 e 16. Os frutos acondicionados a 12°C e 20°C apresentaram tendência de PMF semelhante até o 16º dia. O armazenamento dos frutos a 10°C mostrou acentuada tendência de PMF, após o 24º dia de armazenamento registrando perda de massa de 8,8% no 36º dia.

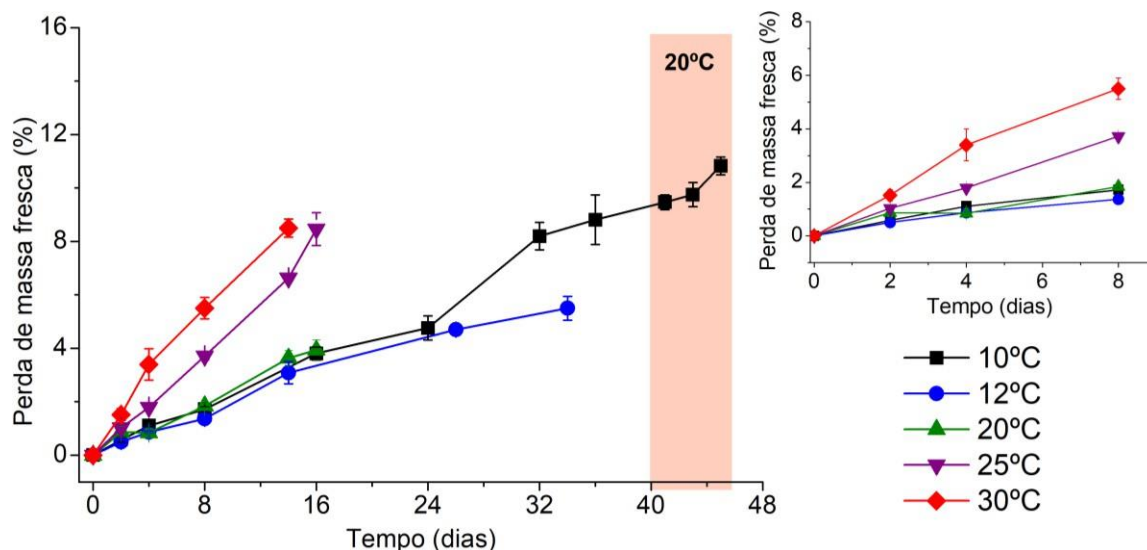


Figura 1. Perda de massa fresca do mamão armazenado em diferentes temperaturas e UR de $80\% \pm 5\%$, em função do tempo de armazenamento. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C , após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C , assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação da perda de massa fresca dos frutos em resposta à temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

A PMF é condicionada pela respiração, através da conversão metabólica do açúcar em CO_2 e H_2O junto à evaporação do vapor de água e pela transpiração (Nayak et al., 2020). Em temperaturas mais baixas houve menor PMF do fruto, isso ocorre devido à diminuição das taxas metabólicas, suprimindo a perda de peso. Ao diminuir a taxa respiratória o processo de perda de água é desacelerado ocasionando menores perdas de peso (Salehi, 2020).

Os frutos armazenados a 10°C , apresentaram tendência de PMF mais acentuada após o 24º dia de armazenamento, o que pode ter sido ocasionado devido ao longo período de armazenamento sob baixa temperatura. Quanto maior a exposição do fruto à baixa temperatura, maior são os sintomas de injúria por frio, sendo a desidratação um sintoma de injúria por frio (Ren et al., 2020). O mamão quando exposto a baixas temperaturas pode sofrer diversas modificações estruturais em sua parede celular, a solubilização e despolimerização da parede celular reduz a rigidez celular tornando as células flácidas, podendo ocasionar

maior extravasamento do conteúdo celular, e resultar na intensificação da evapotranspiração de água do tecido do fruto (Carvajal et al., 2015).

O desverdecimento e, ou o amarelecimento da casca, expresso pela diminuição do ângulo de cor *hue*, são marcantes indicações da maturação dos frutos. Os frutos armazenados durante 40 dias a 10°C não apresentaram mudança na coloração do epicarpo, porém após serem submetidos à temperatura de 20°C expressaram sutil mudança visual na coloração da casca (Figura 2) e decréscimo mais acentuado *do hue* no 5º dia após a elevação da temperatura (Figura 3).

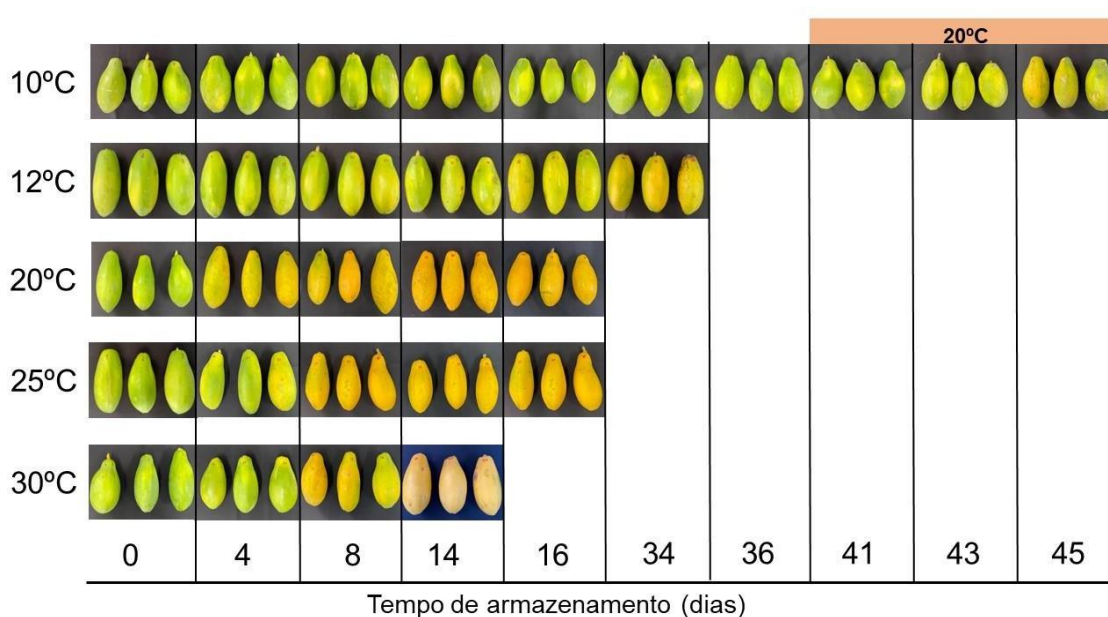


Figura 2. Mudança visual na coloração do epicarpo de mamões armazenados em diferentes temperaturas e UR de 80% \pm 5%, em função do tempo de armazenamento. São representados três mamões para cada tempo e temperatura de armazenamento. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias.

Os frutos armazenados em temperaturas mais baixas se mantiveram por mais tempo com menor mudança visual na Cor (Figura 2). A temperatura de 10°C inibiu a mudança de coloração dos frutos e mesmo após a mudança da temperatura do armazenamento para 20°C, a mudança de cor não ocorreu de forma completa.

Resultado semelhante foi observado por Zhu et al. (2023), que ao armazenar mamão a 12°C e 7°C, durante 15 e 25 dias, verificaram mudanças completas de coloração nos frutos quando armazenados a 12°C e 7°C por 15 dias, mas não naqueles armazenados a 7°C por 25 dias.

Os frutos após 40 dias de armazenamento a 10°C, apresentaram sinais intensos de *chilling* após a mudança da temperatura de armazenamento para 20°C. Constata-se uma aceleração do amadurecimento após a mudança da temperatura para 20°C, além dos frutos apresentarem grandes áreas com manchas na casca e doenças, principalmente devido à infecção por patógenos. Resultados semelhantes foram observados por Zhu et al. (2023) em mamões armazenados a 7°C por 25 dias.

Os frutos de mamão mudaram de Cor de verde para amarelo ao longo do armazenamento, sendo acompanhada esta mudança pelo decréscimo no valor do ângulo *hue* (Figura 3).

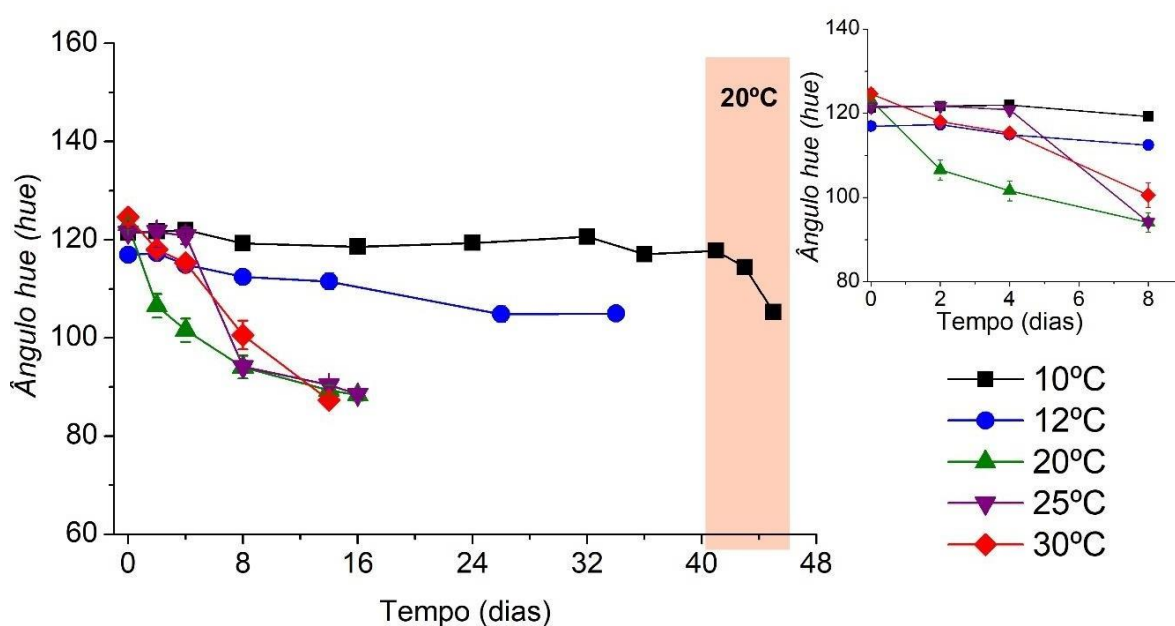


Figura 3. Ângulo *hue* do mamão armazenado em diferentes temperaturas, em função do tempo de armazenamento e UR de 80% \pm 5%. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação do ângulo *hue* em resposta da temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

Os frutos armazenados nas temperaturas mais altas (20°C, 25°C e 30°C) apresentaram os menores valores de *hue*, com média de 87,9, ao fim do armazenamento, e maior taxa de diminuição desse parâmetro ao longo do tempo. Por outro lado, os frutos armazenados a 12°C mostraram um atraso na mudança da coloração, com pequeno decréscimo desse parâmetro a partir do 14º dia, chegando em valor médio do *hue* de 105,2 no 34º dia de armazenamento (Figura 3). Os frutos armazenados a 10°C não apresentaram mudança no *hue* durante todo o período de armazenamento.

Gomes et al. (2016) ao armazenar mamão a 10°C por 10 dias constataram que houve retardo no amadurecimento, e que as atividades metabólicas envolvidas na alteração de cor poderiam ser restabelecidas ao aumentar a temperatura para 22°C. Contudo, Bron e Jacomino (2009) ao armazenar mamões a 11°C por um período de 20 dias, os frutos não atingiram as mesmas taxas de emissão de etileno que os frutos controle, após aumento da temperatura para 23°C. Isso sugere que, quanto maior for a exposição do fruto a baixas temperaturas menor será a recuperação das atividades metabólicas.

Os menores valores de *hue* ao fim do armazenamento dos frutos sob temperaturas de 10°C e 12°C (Figura 3) significam menor amarelecimento, o que pode ser observado na Figura 2. O mesmo foi observado por Vinod et al. (2024), que registraram maiores valores de ângulo de cor *hue* na casca do mamão tratado com ozônio no 20º dia de armazenamento a 13°C. Os resultados indicam que sob temperaturas mais baixas, a degradação da clorofila e a síntese de carotenoides é inibida.

A FF foi inversamente proporcional à temperatura de armazenamento; frutos armazenados em temperaturas mais altas mostraram perda de FF mais rápido que frutos mantidos em temperaturas mais baixas (Figura 4). Os frutos armazenados a 20°C, 25°C e 30°C, apresentaram decréscimo acentuado da FF a partir do 2º dia e médias semelhantes de 11,89, 10,99, 12,1, respectivamente, ao fim do armazenamento. Os frutos armazenados a 10°C e 12°C apresentaram queda sutil na FF nos primeiros 8 dias. Nos frutos armazenados a 12°C a redução na FF foi maior após o 14º dia. Já os frutos armazenados a 10°C não expressaram variação

mais expressiva na FF até o 40º dia, contudo após serem submetidos à temperatura de 20°C, observou-se decréscimo acentuado da FF.

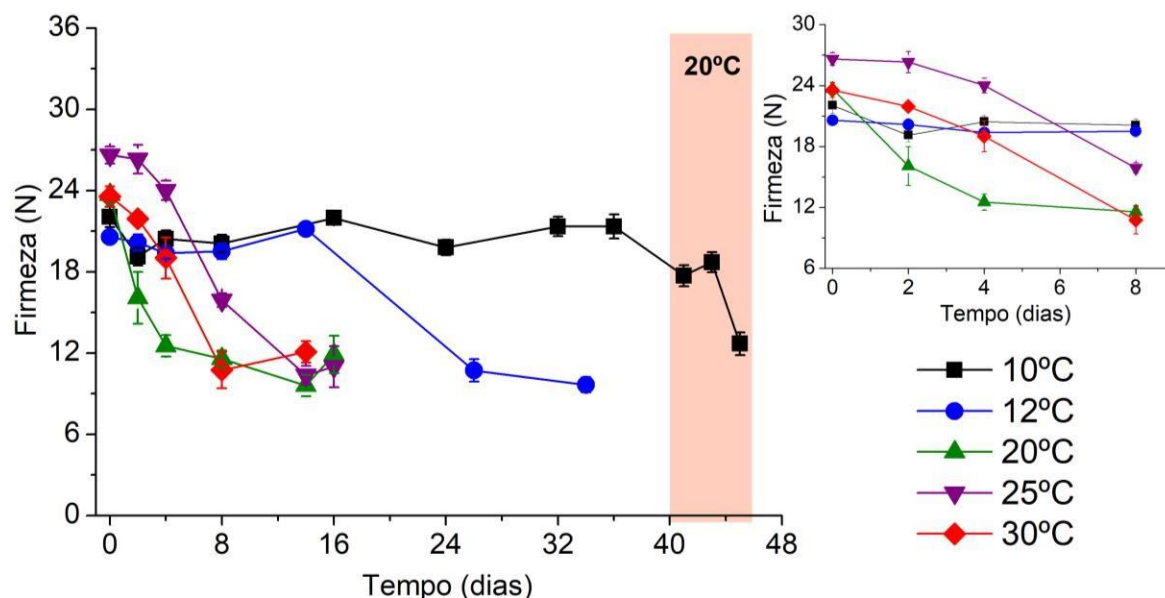


Figura 4. Firmeza dos frutos de mamão armazenados em diferentes temperaturas, em função do tempo de armazenamento e UR de 80% ± 5%. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação da firmeza em resposta da temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

A FF reflete diretamente o amadurecimento do fruto e o grau de amolecimento afeta o manejo e a qualidade pós-colheita. O amolecimento da polpa durante o armazenamento é um processo natural de senescência e ocorre devido a modificações na parede celular, resultantes de uma série ordenada de montagem e desmontagem de constituintes, através da solubilização de pectina e hemicelulose, até a perda de adesão celular que por sua vez leva ao amolecimento do fruto (Kumar et al., 2018).

Em estudos realizados com mamão, Zhu et al. (2023) verificaram que a firmeza do fruto armazenado a 12°C diminuiu lentamente enquanto o mesmo estava sob refrigeração. Segundo esses autores, após a mudança dos frutos do

armazenamento refrigerado para a condição ambiente, o amadurecimento do fruto foi acelerado, quando o mesmo perdeu a firmeza completamente. O que corrobora com o presente trabalho, pois também foi observado padrão semelhante para a firmeza do mamão armazenado a 10°C, a qual não apresentou alteração significativa enquanto os frutos foram mantidos nessas condições, mostrando, porém, rápida perda de firmeza quando a temperatura de armazenamento foi elevada para 20°C.

A ICM apresentou decréscimo acelerado nos frutos armazenados nas temperaturas de 20°C, 25°C e 30°C, com menores valores no 8º dia (Figura 5). Nos frutos armazenados a 20°C verificou-se um rápido decréscimo na ICM logo no 2º dia de armazenamento. Por outro lado, nos frutos armazenados a 30°C a queda na ICM ocorreu a partir do 2º dia, enquanto nos frutos acondicionados a 25°C a queda da ICM ocorreu a partir do 4º dia de armazenamento.

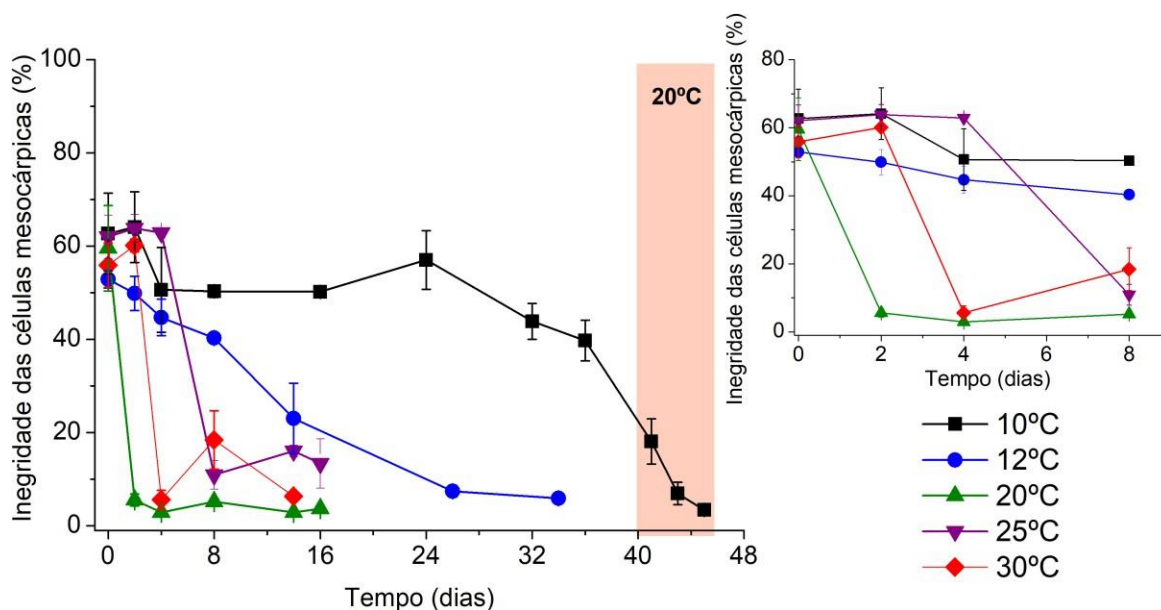


Figura 5. Integridade das células mesocárpicas dos frutos de mamão armazenados em diferentes temperaturas, em função do tempo de armazenamento e UR de 80% \pm 5%. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação da integridade celular em resposta da temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

O armazenamento dos frutos na temperatura de 12°C levou a uma redução na ICM, sendo verificada uma pequena queda nos primeiros 8 dias de armazenamento. De acordo com a Figura 5 pode-se afirmar que a permeabilidade da membrana celular do tecido da polpa dos frutos, indicada pelo vazamento relativo de eletrólitos, é crescente (menor integridade de membrana) durante todo o armazenamento, o que corresponde ao período de amadurecimento dos frutos, sendo essa mudança mais intensa nos frutos armazenados sob temperaturas mais elevadas e menor naqueles armazenados sob baixas temperaturas.

A integridade das células mesocárpicas serve como um indicador importante de danos ao sistema de membranas celulares em tecidos de frutos (Nian et al., 2022). O aumento da permeabilidade da membrana, indicado pelo vazamento de eletrólitos, sugere uma perda da integridade da membrana celular, muitas vezes associada à peroxidação lipídica causada pela produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Neto et al., 2019). Além da integridade das membranas, a integridade dos tecidos nos frutos também está intimamente relacionada com a integridade da parede celular (Tao e Pan, 2023).

O decréscimo da ICM nas temperaturas de armazenamento, embora não tenha sido tão acentuada a 12°C, reflete o parâmetro de FF (Figura 4). Sugerindo que a FF pode ser utilizada para prever a ICM dos frutos de mamão, quando acondicionados em atmosfera controlada dinâmica, de modo a permitir a correção da atmosfera de armazenamento através da monitoração da FF e prever a mudança da ICM através da variação da FF.

O teor de SS dos frutos permaneceu constante quando os mesmos foram armazenados a 10°C, 12°C e 20°C. Os frutos armazenados a 25°C apresentaram tendência de aumento no teor de SS a partir do 2º dia de armazenamento, alcançando o valor mais alto de 12,1 °Brix no 8º dia de armazenamento e depois reduzindo a 7,7 °Brix no fim do armazenamento aos 16 dias (Figura 6).

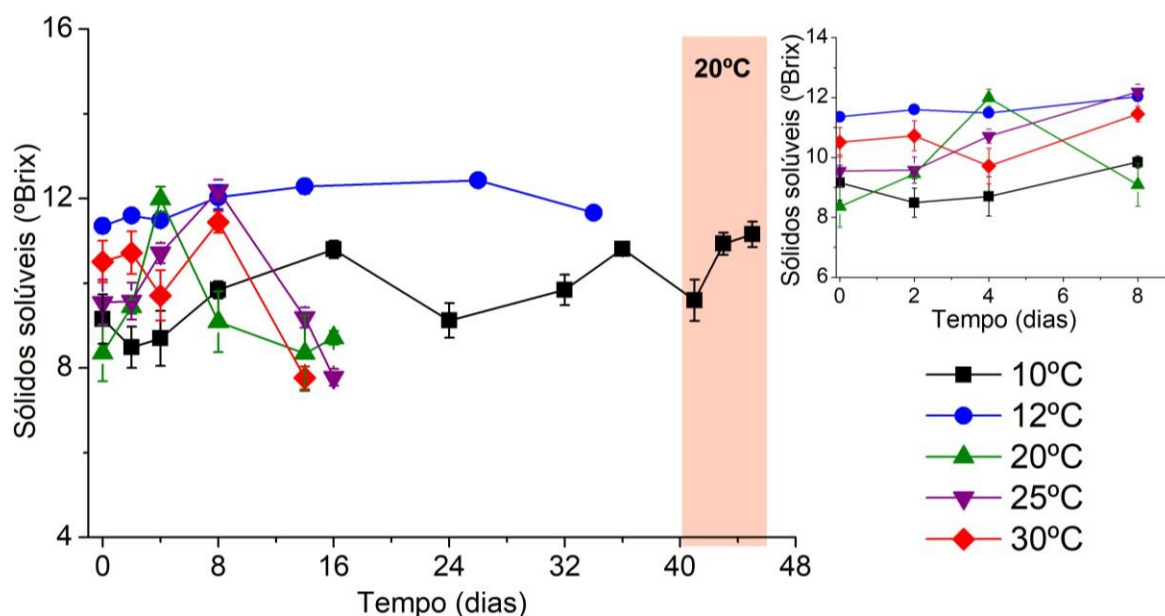


Figura 6. Teor de SS dos frutos de mamão armazenados em diferentes temperaturas, em função do tempo de armazenamento e UR de 80% \pm 5%. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação do teor de SS em resposta da temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

Os frutos armazenados a 12°C apresentaram pouca variação nos teores de SS durante o armazenamento. Segundo Vinod et al. (2024), menores taxas de respiração favorecem o acúmulo de SS nos frutos armazenados. Desse modo, os frutos armazenados a 25°C e 30°C apresentaram maiores teores de sólidos solúveis ao dia 8, seguido de queda acentuada, provavelmente devido às temperaturas mais elevadas que aumentaram a taxa respiratória dos frutos, que pode ter consumido SS nesse processo. Outra justificativa para o decréscimo no teor de SS pode estar relacionada à perda de integridade celular, que pode ter diluído o SS devido ao extravasamento do conteúdo intracelular.

A avaliação da AT dos frutos nos primeiros 8 dias de armazenamento mostra tendência de estabilização, com exceção para os frutos armazenados a 10°C e a 30°C que mostraram uma tendência de aumento e redução, respectivamente, na AT nesse período (Figura 7). Quando se avalia todo o período de armazenamento, verifica-se que os frutos submetidos à temperatura de 30°C apresentaram

acentuada queda na AT durante os dias 4, 8 e 14 de armazenamento. Por outro lado, os frutos armazenados a 10°C tiveram um aumento na AT até o 24° dia, seguido de queda acentuada da AT até o 32° dia, se mantendo em valores estáveis a partir daí (Figura 7).

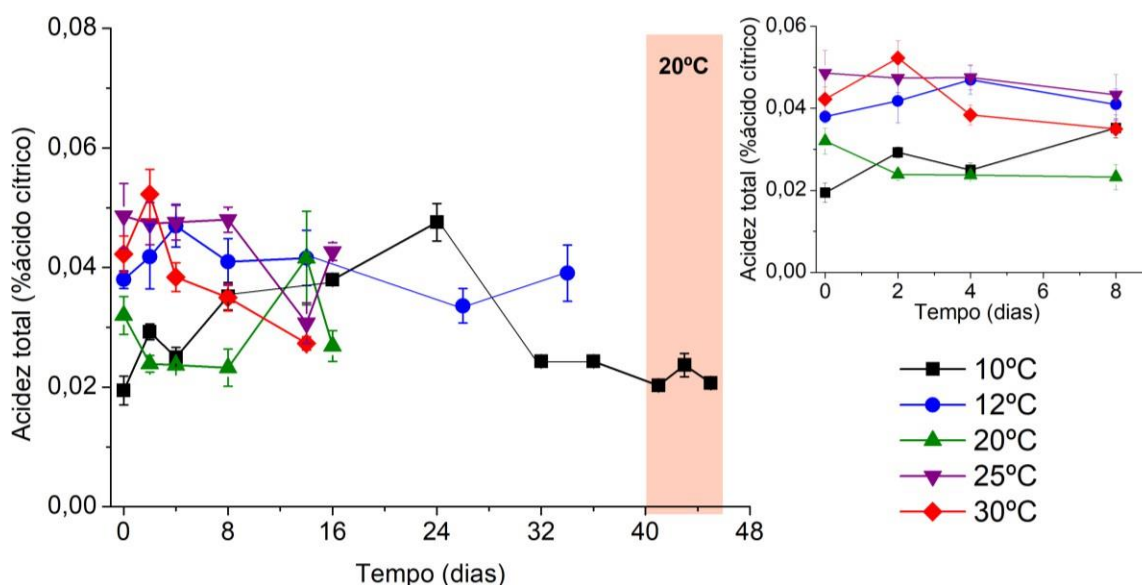


Figura 7. A AT dos frutos de mamão armazenados em diferentes temperaturas, em função do tempo de armazenamento e UR de 80% \pm 5%. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação do teor de SS em resposta da temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

Normalmente não são observadas alterações no teor de acidez da polpa do mamão durante o amadurecimento do fruto, sendo que a média obtida para o fruto mantido em temperatura ambiente é de aproximadamente 0,9% (Galon et al., 2022). Bron e Jacomino (2006) ao armazenar mamão a 10°C obtiveram que a AT não apresentou diferença entre os frutos. No presente estudo pode-se observar uma tendência inicial de aumento na AT e posterior decréscimo em frutos armazenados a 10°C. De acordo com John et al. (2018), o aumento no teor de AT nos frutos pode ter ocorrido devido a degradação da pectina e a formação de ácido galacturônico, na medida em que a parede celular se degrada durante o amadurecimento.

Durante o processo de amadurecimento, pode ocorrer o aumento na acidez, com diminuição gradativa do pH, possivelmente pela síntese de ácidos orgânicos resultante da degradação da parede celular, e o declínio indica a conversão desses ácidos e açúcares e sua posterior utilização no processo metabólico da respiração, assim como em outros processos bioquímicos (Kumar et al., 2015).

O ratio apresentou uma tendência de queda nos frutos mantidos a 10°C nos primeiros 8 dias de armazenamento, seguido de aumento após o 24° dia (Figura 8). Por outro lado, os frutos armazenados a 20°C apresentaram acentuado aumento no ratio nos primeiros 8 dias de armazenamento indicando sabor característico de fruto maduro (Figura 8).

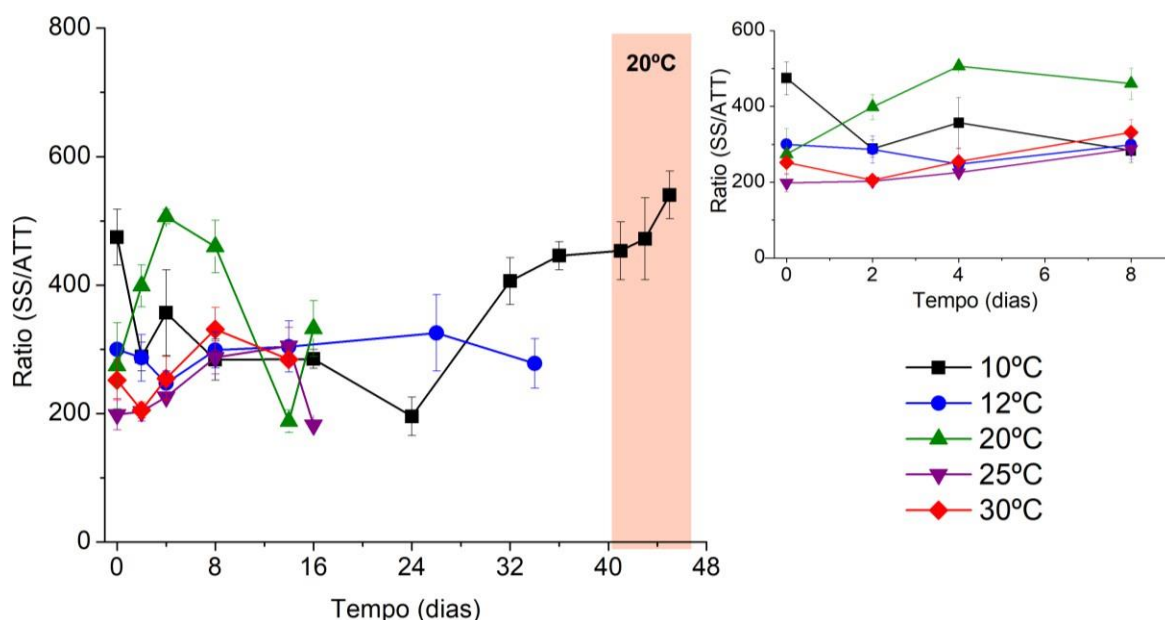


Figura 8. Ratio (SS/TT) dos frutos de mamão armazenados em diferentes temperaturas, em função do tempo de armazenamento e UR de 80% ± 5%. Os valores representam a média de 3 frutos e a barra o erro padrão. No tratamento a 10°C, após 40 dias de armazenamento a temperatura foi elevada para 20°C, assim permanecendo até o encerramento do ensaio aos 45 dias. Em detalhe é apresentada a variação do teor de SS em resposta da temperatura de armazenamento nos 8 primeiros dias.

Os frutos mantidos a 12°C apresentaram ratio constante durante o armazenamento, devido ao fato de os teores de SS (Figura 6) e AT (Figura 7) desses frutos não terem variado significativamente durante o armazenamento sob

essas condições. Os dados aqui apresentados diferem dos dados obtidos por Hanif et al. (2020), no qual a relação SS/AT dos frutos de mamão armazenados a 12°C aumentou ao longo do tempo de armazenamento.

Os frutos armazenados a 20°C apresentaram uma redução intensa na ratio após o 8º dia, o que resulta em sabor mais ácido do fruto. A relação SS/AT é uma variável importante, e, normalmente, frutas com uma ratio mais elevada têm maior percepção de sabor por parte dos consumidores, o que pode resultar em uma maior aceitação (Reis et al., 2015).

6.2. Plot de Arrhenius

A comparação do efeito das diferentes temperaturas sobre a PMF utilizando o plot de Arrhenius mostrou boa correlação ($R^2 = 0,95443$), indicando a alta relação entre a PMF e a temperatura de armazenamento dos frutos. Através do plot de Arrhenius foi possível a determinação da energia de ativação relacionada ao processo celular da perda de massa, correspondendo esse ao valor de 14,5 kcal.mol⁻¹ (Figura 9).

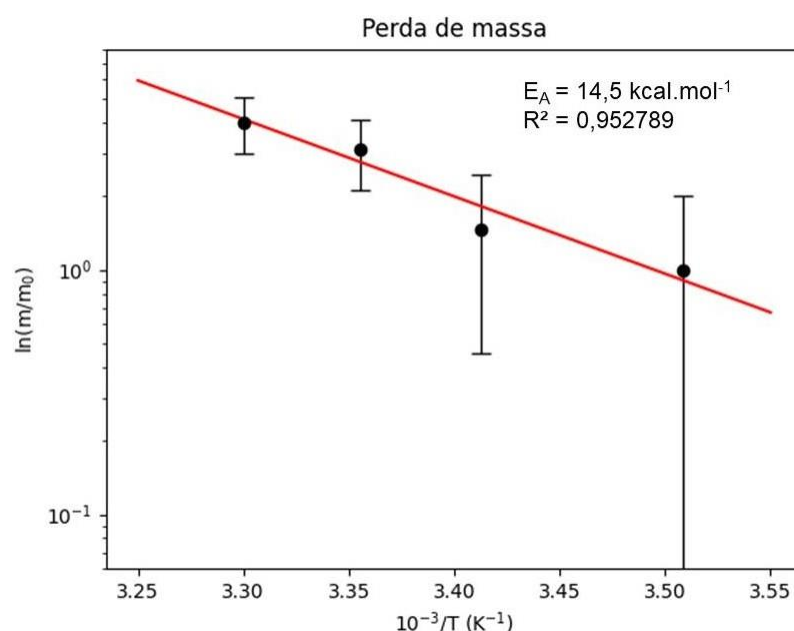


Figura 9. Plot de Arrhenius para a relação da perda de massa fresca do fruto em função das diferentes temperaturas de armazenamento e UR de 80% ± 5%. Na ordenada está representada a taxa da perda de massa fresca do fruto, enquanto

na coordenada o inverso da temperatura de armazenamento ($1/T$, em Kelvin); E_A , representa a energia de ativação para o processo celular em questão.

A aplicação do plot de Arrhenius em processos fisiológicos com frutos foi utilizada por Chokngamvong e Suvanjumrat (2023), que obtiveram valores para a energia de ativação na faixa entre 16,29 e 21,95 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ao investigarem a influência da velocidade do ar para secagem de abacaxi por fluxo cruzado. Os valores obtidos pelos autores acima citados são um pouco superiores ao valor encontrado no presente estudo, 14,5 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, o que se deve à diferença entre os processos analisados e entre os frutos em estudo. Enquanto o trabalho de Chokngamvong e Suvanjumrat (2023) quantificou a secagem da polpa do fruto, aqui o trabalho avaliou a perda de massa fresca, ou para aproximar a comparação, poderia ser denominado de desidratação natural. Espera-se que o processo de secagem demande mais energia para ocorrer se comparado ao processo de perda de massa fresca, que poderia ser considerado um processo, natural, que antecede à secagem do tecido vegetal. Certamente, ambos os processos, secagem e perda de massa fresca são processos diretamente afetados pela temperatura, onde temperaturas mais altas resultam em maiores perdas de massa fresca (Figura 1), devido a desidratação e a transpiração do tecido.

A utilização do plot de Arrhenius para descrever a influência da temperatura de armazenamento do mamão na coloração dos frutos a partir do ângulo de cor *hue* não apresentou um bom ajuste, com $R^2 = 0,260152$, o que mostra baixa correlação entre cor da casca e temperatura de armazenamento. A partir do plot de Arrhenius foi determinada a energia de ativação desse processo e o valor obtido foi de 6,8 $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ (Figura 10).

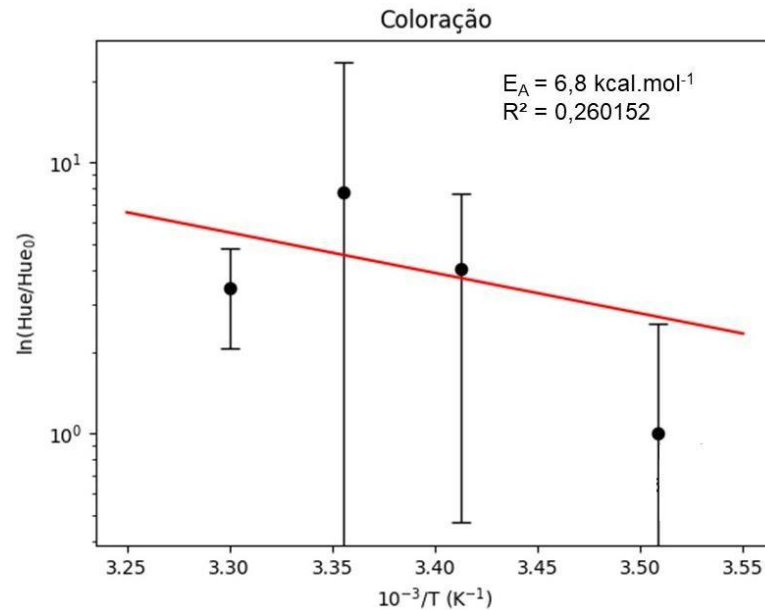


Figura 10. Plot de Arrhenius para a relação do ângulo de cor *hue* do fruto em função das diferentes temperaturas de armazenamento e UR de $80\% \pm 5\%$. Na ordenada está representada a taxa da mudança no ângulo *hue* do fruto, enquanto na coordenada o inverso da temperatura de armazenamento ($1/T$, em Kelvin); E_A , representa a energia de ativação para o processo celular em questão.

Karadeniz et al. (2024) ao estudarem o efeito da temperatura no preparo de pasta de tâmara, constataram que o aumento da temperatura acelerou a perda da tonalidade. De acordo com esses autores, a energia de ativação para esse processo foi de $71,05 \text{ kcal.mol}^{-1}$. Prabhaka et al. (2022) encontraram valores de energia de ativação em uma faixa de $6,53$ a $25,38 \text{ kJ.mol}^{-1}$ para a mudança de cor da noz-pecã durante o armazenamento das mesmas. No estudo aqui apresentado, embora seja possível a avaliação visual (Figura 2) e os dados do ângulo de cor *hue* da casca apresentem diferentes tendências de diminuição em função das diferentes temperaturas de armazenamento (Figura 3) não foi possível obter um bom ajuste no plot de Arrhenius, talvez devido à não precisão na tomada de dados, ou por alguma falha na padronização da análise de cor da casca do fruto, ou por variação intrínseca do material biológico.

Na avaliação do efeito da temperatura de armazenamento sobre a firmeza dos frutos utilizando o plot de Arrhenius, foi obtido um nível de correlação com R^2

= 0,680689, que é um pouco melhor do que aquele informado anteriormente para a coloração da casca, porém também indicando um nível baixo de precisão na tomada dos dados. Nesse caso, a energia de ativação para esse processo foi de $6,0 \text{ kcal.mol}^{-1}$ (Figura 11).

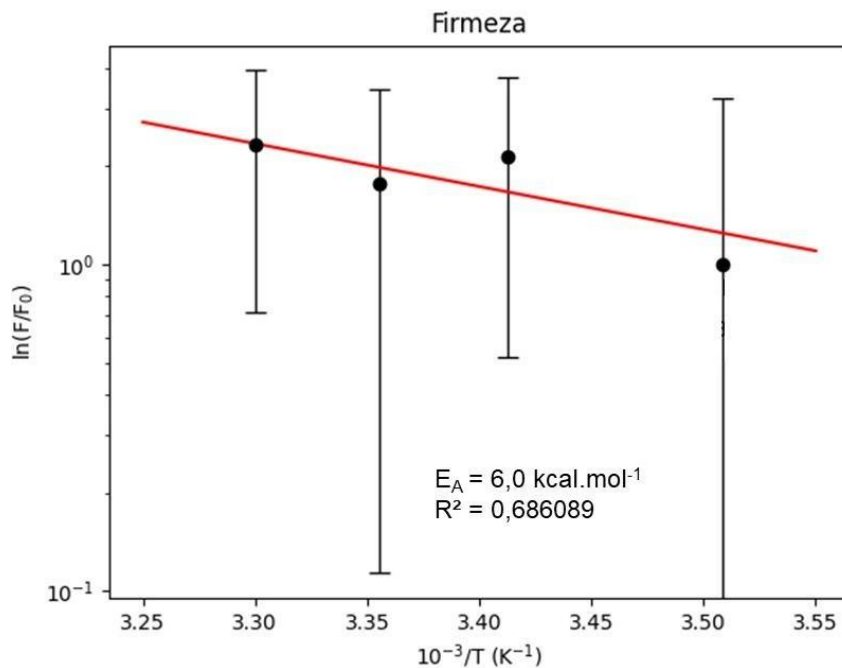


Figura 11. Plot de Arrhenius para a relação da firmeza do fruto em função das diferentes temperaturas de armazenamento e UR de 80% ± 5%. Na ordenada está representada a taxa da perda de firmeza do fruto, enquanto na coordenada o inverso da temperatura de armazenamento ($1/T$, em Kelvin); E_A , representa a energia de ativação para o processo celular em questão.

A temperatura afeta o amaciamento da polpa dos mamões, influenciando as constantes de velocidade das diversas reações que estão implicadas na perda de firmeza.

Dijk et al. (2006) ao estudar a firmeza do tomate armazenado em diferentes temperaturas (3°C , 12°C , 20°C e 25°C) obtiveram E_A de $82,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Johnston et al. (2001) constataram E_A de $71,766 \text{ kJ.mol}^{-1}$ para a perda de firmeza em maçãs 'Royal Gala' e E_A de $82,699 \text{ kJ.mol}^{-1}$ para maçãs 'Cox's Orange Pippin'. Os dados

encontrados na literatura apresentam valores ligeiramente maiores que os obtidos no trabalho. Isso pode ser devido à linha de tendência não ter bom ajuste em relação aos dados ($R^2 = 0,686089$), ou devido à tomada dos dados não ter sido precisa, ou devido às características biológicas do material.

O emprego do plot de Arrhenius para a verificação do efeito da temperatura de armazenamento sobre a integridade das células mesocárpicas mostrou que a energia de ativação para esse processo foi de 17 kcal.mol^{-1} . Ainda de acordo com o plot de Arrhenius a variação na integridade das células mesocárpicas pode ser explicada pela variação na temperatura de armazenamento dos frutos com uma aproximação de 95,5% (Figura 12).

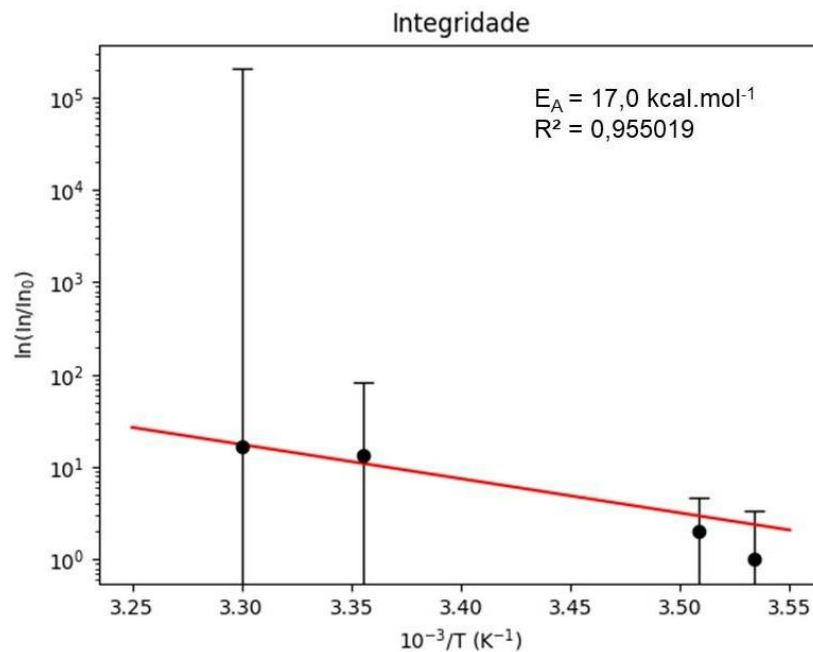


Figura 12. Plot de Arrhenius para a relação da integridade das células mesocárpicas do fruto em função das diferentes temperaturas de armazenamento e UR de $80\% \pm 5\%$. Na ordenada está representada a taxa da perda de integridade das células do fruto, enquanto na coordenada o inverso da temperatura de armazenamento ($1/T$, em Kelvin); E_A , representa a energia de ativação para o processo celular em questão.

A integridade das células do fruto é um parâmetro que se mostrou fortemente relacionado com a temperatura de armazenamento do fruto e que demanda uma alta energia de ativação para modificá-la (a integridade). Isto significa que, nos frutos armazenados sob baixa temperatura, poucas mudanças na integridade das células do fruto ocorrerão, dada a sua alta energia de ativação. A energia de ativação é um parâmetro importante que mostra a sensibilidade da taxa de reação de um determinado processo à temperatura. Alto valor de energia de ativação, indica que a taxa de reação é mais sensível às mudanças de temperatura (Ling et al., 2015). Em condições de baixa temperatura, devido à integridade demandar maior energia para ocorrer, a taxa deste parâmetro ocorrerá de forma mais lenta se comparado, por exemplo com as mudanças na firmeza do fruto e coloração da casca, já que são as características que apresentaram menor energia de ativação. Portanto, o aumento da temperatura pode aumentar a probabilidade que as moléculas possuam energia suficiente para superar a energia de ativação, resultando em uma taxa de reação mais rápida.

7. CONCLUSÃO

O armazenamento do mamão a 10°C inibiu e retardou as transformações qualitativas envolvidas no processo de amadurecimento do mamão. Frutos de mamoeiro armazenados nas temperaturas de 20°C, 25°C e 30°C apresentaram mudanças na firmeza, na integridade das células e no ângulo *hue* com padrões muito semelhantes. O armazenamento do mamão nas temperaturas de 20°C e 10°C mostrou efeito semelhante na perda de massa fresca do fruto. Os frutos armazenados em menores temperaturas tiveram a vida útil dobrada e dos atributos de qualidade prolongado em comparação com os frutos armazenados em altas temperaturas.

A integridade das células mesocárpicas e a perda de massa fresca foram as variáveis de qualidade que apresentaram melhor ajuste no plot de Arrhenius e pode ser usado para estimar a perda desses atributos de qualidade em diferentes temperaturas de armazenamento, podendo ser usado para melhorar sistemas de armazenamento e aumentar a vida útil deste produto. A mudança na integridade das células mesocárpicas do mamão foi o processo que demandou maior energia de ativação, o que indica que esse atributo de qualidade tem maior dependência da temperatura, por isso, é mais susceptível à transformação em função da temperatura de armazenamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, P., Jaleel, C.A., Salem M.A., Nabi G., Sharma S. (2010) Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Crit. Rev. Biotechnol.* 30(3):161-175.

AOAC. (1975) *Official Methods of Analysis: 12th edition*. Washington: Association of Official Analytical Chemists.

Arriola, M.C., Calzada, J.F., Menchu, J.F., Rolz, C., Garcia, R. (1980) Papaya. *In: Nagy, S., Shawn, P.E. (eds.) Tropical and subtropical fruits*. Westport: AVI, p. 316-340.

Atkin, O.K., Bruhn, D., Hurry, V.M., Tjoelker, M.G. (2005) The hot and the cold: unraveling the variable response of plant respiration to temperature. *Funct. Plant. Biol.* 32:87-105.

Azevedo, A.M., Andrade Júnior, V.C., Oliveira, C.M., Pedrosa, C.E., Dornas, M.F.S., Castro, B.M.C., Neiva, I.P., Rodrigues, G.A., Ferreira, M.A.M. (2011) Perda de massa fresca e senescência de genótipos de alface cultivados em ambiente protegido. *Anais do Congresso Brasileiro de Olericultura*, 51, Viçosa: S5098-S5106.

Azevedo, I.G., Oliveira, J.G., Silva, M.G., Pereira, T., Correia, S.F., Vargas, H., Façanha, A. (2008) R. P-type H⁺-ATPases activity, membrane integrity, and apoplastic pH during papaya fruit ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 48:242-247.

Badillo, V.M. (1993) *Caricaceae: segundo esquema*. Caracas: Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, 1-11p.

Balbino, J.M.S. (2003) Colheita, pós-colheita e fisiologia do amadurecimento do mamão *In: Martins, D.S., Costa, A.F.S. (eds) A cultura do mamoeiro: tecnologia de produção*. 1. ed. Vitória: Incaper, p. 403-440.

Barbosa, N.C. (2013) *Taxa de respiração do mamão em função das diferentes condições de atmosferas de armazenamento em temperatura ambiente*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 87p.

Belwal, T., Pandey, A., Bhatt, I.D., Rawal, R.S., Luo, Z. (2019) Trends of polyphenolics and anthocyanins accumulation along ripening stages of wild edible fruits of Indian Himalayan region. *Sci. Rep.* 9:5894.

Brackmann, A. (2006) Armazenamento em atmosfera modificada e controlada de banana prata com absorção de etileno. *Ciênc. Agrotec.* 5:914-919.

Brackmann, A., Steffens, C.A., Giehl, R.F.H. (2003) Armazenamento de pêssego “Chimarrita” em atmosfera controlada e sob absorção de etileno. *Ciênc. Rural* 33(3):431–435.

Brackmann, A., Girardi, C.L., Bender, R.J., Filho, O.S.R. (2004) Armazenamento Refrigerado. *In: Kovalski, A., Parussolo, A., Hoffman, A., Brackmann, A., Zancan, C., Girardi, C.L., Freire, C.J.S., Basso, C., Camelatto, D., Denardi, F., Leite, G.B., Nachtigall, G.R., Bernardi, J., Petri, J.L., Mello, L.M.R., Sanhueza, R.M.V., Flores-Cantillano, R.F., Frutas do Brasil – Maçã Pós-colheita*. 1.ed. Brasília: Embrapa, p. 58-66.

Bron, I.U., Jacomino, A.P. (2006) Ripening and quality of “Golden” papaya fruit harvested at different maturity stages. *Braz. J. Plant Physiol.* 18:389–396.

Bron, I.U., Jacomino, A.P. (2009) O bloqueio da ação do etileno e o armazenamento refrigerado afetam o amadurecimento do mamão 'Golden'. *Acta Physiol. Plant.* 31:1165-1173.

Brumos, J. (2021) Gene regulation in climacteric fruit ripening. *Curr. Opin. Plant Biol.* 63:102042.

Campagnoli, V.P. (2022) *Efeitos do óxido nítrico livre e nanoencapsulado em mamão 'Golden'*. Tese (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical). Campinas – SP, Instituto Agronômico de Campinas – IAC.

Cantillano, R.F. (eds.) *Frutas do Brasil – Maçã Pós-colheita*. 1.ed. Brasília: Embrapa, p. 58-66.

Carvajal, F., Palma, F., Jamilena, M., Garrido, D. (2015) Cell wall metabolism and chilling injury during postharvest cold storage in zucchini fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 108:68-77.

CEAGESP (2003) Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo. Programa Brasileiro de Modernização da Horticultura – Normas de Classificação do Mamão. Centro de Qualidade em Horticultura – CQH/CEAGESP. São Paulo (CGH. Documentos, 25).

Chitarra, M.I.F., Chitarra, A.B. (2005) *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. 2. ed. Lavras: UFLA., 785p.

Chokngamvong, S., Suvanjumrat, C. (2023) Study of drying kinetics and activation energy for drying a pineapple piece in the crossflow dehydrator. *Case Stud. Therm. Eng.* 49:103351.

Choo, W.S. (2019) Fruit Pigment Changes During Ripening. *In*: Melton, L., Shahidi, F., Varelis, P. (eds.) *Encyclopedia of Food Chemistry*. 1. ed. Washington: Academic Press, p.117-123.

Contador, L., Shinya, P., Infante, R. (2015) Texture phenotyping in fresh fleshy fruits. *Int. J. Hortic. Sci.* 193:40-46.

Dijk, C.V., Boeriu, C., Peter, F., Stolle-Smits, T., Tijssens, L.M.M. (2006) The firmness of stored tomatoes (cv. Tradiro). 1. The firmness of stored tomatoes (cv. Tradiro). 1. Kinetic and near infrared models to describe firmness and moisture loss. *J. Food Eng.* 77(3):575-584.

FAO. Food agricultural commodities production. http://faostat3.fao.org/browse/rankings/commodities_by_regions/E. Acessado em 09/07/2022.

Feng, Y., Li, X., Boersma, L. (1990) The Arrhenius equation as a model for explaining plant responses to temperature and water stresses. *Ann. Bot.* 66(2):237-244.

Fonseca, M.J.O., Cenci, S.A., Leal, N.R., Botrel, N. (2003) Uso de atmosfera controlada para conservação pós-colheita do mamão 'Golden'. *Rev. Bras. Frutic.* 25(3):537-539.

Gallon, Z.C., Shiga, T., Purgatto, E., Jacomino, A.P. (2021) Occurrence of early softening in papaya due to specific cell wall-related changes. *Int. J. Hortic. Sci.* 297:110915.

Garavito, J., Herrera, A.O., Castellanos, D.A. (2021) A combined mathematical model to represent transpiration, respiration, and water activity changes in fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana*) fruits. *Biosyst. Eng.* 208:152-163.

Giordano, L.B., Silva, J.B.C., Barbosa, V. (2000) Escolha de cultivares e plantio. *In:* Silva, J.B.C., Giordano, L.B. (org.) Tomate para processamento industrial. 1. ed. Brasília: Embrapa, p.36-59.

Godoy, A.E., Jacomino, A.P., Cerqueira-Pereira, E.C., Gutierrez, A.S.D., Vieira, C.E.M., Forato, L.A. (2010) Injúrias mecânicas e seus efeitos na qualidade de mamões 'Golden'. *Rev. Bras. Frutic.* 32(3):682-691.

Gomes, B.L., Fabi, J.P., Purgatto, E. (2016) Cold storage affects the volatile profile and expression of a putative linalool synthase of papaya fruit. *Int. Food Res. J.* 89:654-660.

Gorfer, L.M., Vestrucci, L., Grigoletto, V., Lazazzara, V., Zanella, A., Robatscher, P., Scampicchio, M., Oberhuber, M. (2022) Chlorophyll breakdown during fruit ripening: Qualitative analysis of phyllobilins in the peel of apples (*Malus domestica* Borkh.) cv. 'Gala' during different shelf life stages. *Int. Food Res. J.* 162:112061.

Hanif, A., Ahmad, S., Jaskani, J. M., Ahmad, R. (2020) Papaya treatment with putrescine maintained the overall quality and promoted the antioxidative enzyme activities of the stored fruit. *Int. J. Hortic. Sci.* 268:109367.

Heyes, J.A. (2018) Chilling injury in tropical crops after harvest. *Annu. Plant Rev. Online* 1:149-180.

Ho, P.L., Tran, D.T., Hertog, M.L., Nicolai, B.M. (2020) Modelling respiration rate of dragon fruit as a function of gas composition and temperature. *Sci. Hortic.* 263:109138.

Huang, H., Wang, L. (2023) Alteration of surface morphologies and chemical composition of cuticle in response to chilling injury in papaya (*Carica papaya* L.) after harvest. *Food Chem.* 416:135751.

IBGE. PAM- Produção agrícola municipal.
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>. Acessado em 15/01/2024.

Lqbal, N., Khan, N.A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A., Khan, M.I.R. (2017) Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. *Front. Plant Sci.* 8:475.

Jacomino, A.P., Bron, I.U., Kluge, R.A. (2003) Avanços em tecnologia pós-colheita de mamão. In: Martins, D. dos S. (ed.) *Papaya Brasil: qualidade do mamão para o mercado interno*. 1. Ed. Vitória: Incaper, p. 279-289.

John, A.; Yanga, J., Liu, J., Jiang, Y., Yang, B. (2018) The structure changes of water-soluble polysaccharides in papaya during ripening. *Int. J. Biol. Macromol.* 115:152-156.

Johnson, K.L., Gidley, M.J., Bacic, A., Doblin, M.S. (2017) Cell wall biomechanics: a tractable challenge in manipulating plant cell walls 'fit for purpose'. *Curr. Opin. Biotechnol.* 49:163-171.

Johnston, J.W., Hewett, E.W., Hertog, L.A. T.M., Harker, F.R., (2001) Temperature induces differential softening responses in apple cultivars. *Postharvest Biol. Technol.* 23:185-196.

Kader, A.A. Papaya: recommendations for maintaining postharvest quality. <http://postharvest.ucdavis.edu>. Acessado em 15/12/2024.

Karadeniz, F., Atalay, D., Erge, H.S., Kaya, S., Işık, B., Aslanali, O. (2024) Kinetics of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) formation and colour change in date fruit fillings stored at different temperatures. *J. Food Compos. Anal.* 127:105986.

Kelebek, H., Selli, S., Gubbuk, H., Gunes, E. (2015) Comparative evaluation of volatiles, phenolics, sugars, organic acids and antioxidant properties of Sel-42 and Tainung papaya varieties. *Food Chem.* 173:912-919.

Kerbauy, G.B. (2008) *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

Khaliq, G., Ali, S., Ejaz, S., Abdi, G., Faqir, Y., Ma, J., Siddiqui, M., Ali, A. (2023) γ -Aminobutyric acid is involved in overlapping pathways against chilling injury by modulating glutamate decarboxylase and defense responses in papaya fruit. *Front. Plant Sci.* 14:1-14.

Krongyut, W., Srilaong, V., Uthairatanakij, A., Wongs-Aree, C., Esguerra, E.B., Kanlayanarat, S. (2011) Physiological changes and cell wall degradation in papaya fruits cv. 'Kaek Dum' and 'Red Maradol' treated with 1-methylcyclopropene. *Int. Food Res. J.* 4:251-259.

Kumar, P., Sethi, S., Sharma, R.R., Srivastav, M., Singh, D., Varghese, E. (2018) Edible coatings influence the cold-storage life and quality of 'Santa Rosa' plum (*Prunus salicina* Lindell). *J. Food Sci. Technol.* 55:2344-2350.

Kuwar, U., Sharma, S., Tadapaneni, V.R. (2015) Aloe vera gel and honey based edible coatings combined with chemical dip as a safe means for quality maintenance and shelf life extension of fresh cut papaya. *J. Food Qual.* 38(5):347-358.

Li, X., Zhu, X., Mao, J., Zou, Y., Fu, D., Chen, W., Lu, W. (2013) Isolation and characterization of ethylene response factor family genes during development, ethylene regulation and stress treatments in papaya fruit. *Plant Physiol. Biochem.* 70:81-92.

Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E.J., Wang, S. (2015) Kinetics of food quality changes during thermal processing: a review. *Food Bioprocess Technol.* 8:343-358.

Maia, G.A.; Sousa, P.H.M; Lima, A.S. (2007) *Processamento de sucos de frutas tropicais*. Fortaleza: Editora UFC.

Martins, D.S., Costa, A.F.S. (2003) *A cultura do mamoeiro: tecnologias de produção*. 1. ed. Vitória: Incaper, 497p.

McGuire, R.G. (1992) Reporting of objective colour measurements. *Hort. Sci.* 27:1254–1255.

Mditshwa, A., Khaliq, G., Hussein, Z., Ejaz, S. (2023) Sustainable postharvest management practices for fresh produce. *Front. Sustain. Food Syst.* 7:1-3.

Mo, Y., Jiang, B., Huo, J., Lu, J., Zeng, X., Zhou, Y., Zhang, T., Yang, M., Wei, Y., Liu, K. (2022) Quantitative ubiquitylomic analysis of the dynamic changes and extensive modulation of ubiquitylation in papaya during the fruit ripening process. *Front. Plant Sci.* 13:890581.

Morais, F.A., Araújo, F.M.M.C., Machado, A.V., Ricarte, F.D.N., Júnior, R.S. (2010) Influência da atmosfera modificada sob a vida útil pós-colheita do mamão 'Formosa'. *Revista Verde* 5(4):1-9.

Moreira, R.N.A.G. (2004) Qualidade de frutos de goiabeiras sob manejo orgânico, ensacados com diferentes diâmetros. Tese (Mestrado em Fitotecnia) – Viçosa/MG, Universidade Federal de Viçosa – UFV.

Moretti, C. L., Sargent, S. A., Huber, D.J., Calbo, A.G., Puschmann, R. (1998) Chemical composition and physical properties of pericarp, locule, and placental tissues of tomatoes with internal bruising. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 123(4):656-660.

Mota, J.D., Queiroz, A.J.M., Figueirêdo, R.M.F. de; Sousa, K.S.M. (2015) Color index and correlation with physical and chemical parameters of guava, mango and papaya. *Comum. Sci.* 6(1):74-82.

Nair, G.R., Anagha, S. (2023) Study of biochemical and phytochemical variations in *Carica papaya* L. during storage. *Int. J. Agric. Res.* 2(4):30–34.

Nayak, S.L., Sethi, S., Sharma, R.R., Sharma, R.M., Singh, S., Singh, D. (2020) Aqueous ozone controls decay and maintains quality attributes of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *J. Food Sci. Technol.* 57:319-326.

Nelson, D.L., Cox, M.M. (eds)(2014) *Princípios de bioquímica de Lehninger*. Porto Alegre: Artmed.

Neto, O.P.D.S., Pinto, E.V.D.S., Ootani, M.A., Junior, J.L.D.S., Lima, J.L.D.S.B., Sousa, A.E.D.D. (2019) Ozone slows down anthracnose and increases shelf life of papaya fruits. *Rev. Bras. Frutic.* 41(5):1-11.

Nian, Y., Wang, N., Li, R., Shao, Y., Li, W. (2022) Cold shock treatment alleviates chilling injury in papaya fruit during storage by improving antioxidant capacity and related gene expression. *Sci. Hortic*, 294:110784.

Oliveira, A.M.G.O., Filho P.E.M. (2021) *A cultura do mamoeiro*. 1. ed. Brasília: Embrapa. 426p.

Ong, M.K., Forney, C.F., Alderson, P.G., Ali, A. (2013) Postharvest profile of a Solo variety 'Frangi' during ripening at ambient temperature. *Sci. Hortic.* 160:12-19.

Pan, Y., Zhang, S., Yuan, M., Song, H., Wang, T., Zhang, W., Zhang, Z. (2019) Effect of glycine betaine on chilling injury in relation to energy metabolism in papaya fruit during cold storage. *Food Sci. Nutr.* 7 (3):1123–1130.

Parven, A., Sarker, M.R., Megharaj, M., Meftaul, I.M. (2020) Prolonging the shelf life of Papaya (*Carica papaya* L.) using Aloe vera gel at ambient temperature. *Sci. Hortic.* 265:109228.

Paull, R.E., Oliveira, J.G. (2020) Tropical fruits: Papayas *In: Gil, M.I., Beaudry, R. (eds.) Controlled and modified atmospheres for fresh and fresh-cut produce*. 1. ed. Cambridge: Academic Press, p. 373-379.

Pereira, T., Almeida, P.S.G., Azevedo, I.G., Da Cunha, M., Oliveira, J.G., Silva, M.G., Vargas, H. (2009) Gas diffusion in 'Golden' papaya fruit at different maturity stages. *Postharvest Biol. Technol.*54:123–130.

Plasquy, E., Florido, M.C., Sola-Guirado, R.R., García Martos, J.M., García Martín, J.F. (2021) Effect of temperature and time on oxygen consumption by olive fruit: Empirical study and simulation in a non-ventilated container. *Fermentation* 7(4):200.

Posé, S., Paniagua, C., Matas, A.J., Gunning, A.P., Morris, V.J., Quesada, M.A., Mercado J.A. (2018) A nanostructural view of the cell wall disassembly process during fruit ripening and postharvest storage by atomic force microscopy. *Trends Food Sci.* 87:47–58.

Prabhakar, H., Bock, C.H., Kerr, W.L., Kong, F. (2022) Pecan color change during storage: Kinetics and modeling of the processes. *Curr. Res. Food Sci.* 5:261-271.

Prasad, K., Paul, J.R. (2021) Post-harvest losses of papaya and practice for management. *Food Sci. Rep.* 2(1):7-11.

Reinhardt, D.H.R.C., Lima, M.A.C., Serrano, L.A.L., Souza, J.S., Santana, M.A., Stuchi, E.S., Girardi, E.A., Oliveira, A.M.G., Gerum, A.F.A A., Coelho Filho, M. A., Carvalho, J.E.B., Soares Filho, W.S. (2021) Desenvolvimento e sustentabilidade na fruticultura de exportação. *In: Telhado, S.F.P., Capdeville, G. (eds.). Tecnologias poupa-terra*. Brasília: Embrapa, p.19-42.

Reis, R.C., Viana, E.S., Jesus, J.L., Dantas, J.L.L., Lucena, R.S. (2015) Caracterização físico-química de frutos de novos híbridos e linhagens de mamoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.* 50(3):210-217.

Ren, Y.Y., Sun, P.P., Wang, X.X., Zhu, Z.Y. (2020) Degradation of cell wall polysaccharides and change of related enzyme activities with fruit softening in *Annona squamosa* during storage. *Postharvest Biol. Technol.* 166:111203.

Rodrigues, J.P., Coelho, C.C.S., Soares, A.G., Freitas-Silva, O. (2021) Current technologies to control fungal diseases in postharvest papaya (*Carica papaya* L.). *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 36:102128.

Rodrigues-Amaya, D.B. (1996) Assessment of the provitamin A contents of foods – the Brazilian experience. *J. Food Compos. Anal.* 9(3):196-230.

Salehi, F. (2020) Edible coating of fruits and vegetables using natural gums: A review. *Int. J. Fruit Sci.* 20:570-589.

Samira, A., Woldetsadik, K., Workneh, T.S. (2011) Postharvest quality and shelf life of some hot pepper varieties. *J. Food Sci. Technol.* 50(5):842-855.

Schipper, L.A., Hobbs, J.K., Rutledge, S. and Arcus, V.L. (2014) Thermodynamic theory explains the temperature optima of soil microbial processes and high Q₁₀ values at low temperatures. *Glob. Change Biol.* 20:3578-3586.

Silva, W.J.M., Ferrari, C.K.B. (2011) Metabolismo mitocondrial, radicais livres e envelhecimento. *Rev. Bras. Geriatr. Gerontol.* 14(3):441-451.

Sivakumar, D., Wall, M.M. (2013) Papaya fruit quality management during the postharvest supply chain. *Food Rev. Int.* 29:24-48.

Sonawane, A.D., Chaiwong, S., Weltzien, C., Mahajan, P.V. (2024) A model integrating fruit physiology, perforation, and scavenger for prediction of ethylene accumulation in fruit package. *Postharvest Biol. Technol.* 209:112734.

Souza, A.F., Silva, W.B, Gonçalves, Y.S., Silva, M.G., Oliveira, J.G. (2014) Fisiologia do amadurecimento de mamões de variedades comercializadas no Brasil. *Rev. Bras. Frutic.* 36(2):318–328.

Souza, M.S., Azevedo, I.G., Corrêa, S.F., Silva, M.G., Pereira, M.G., Oliveira, J.G. (2009) Resposta da aplicação do 1-MCP em frutos de mamoeiro 'Golden' em diferentes estádios de maturação. *Rev. Bras. Fruticultura* 31(3):693-700.

Sun, Y., Singh, Z., Tokala, V.Y., Heather, B. (2019) Harvest maturity stage and cold storage period influence lemon fruit quality. *Sci. Hortic.* 249:322–328.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I., Murphy, A. (2017) *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. São Paulo: Artmed.

Tao, S., Pan, Y. (2023) Reduced degradation of the cell wall polysaccharides maintains higher tissue integrity of papaya (*Carica papaya* L.) during chilling storage. *Postharvest Biol. Technol.* 204:112446.

Tilahun, W.W.; Grossi, J.A.S.; Favaro, S. P.; Pimentel, L.D. (2013) Pós-colheita de frutos de Macaúba em ambiente com temperatura controlada: efeito sobre a água na polpa. Anais Congresso Brasileiro De Macaúba, 1, Patos de Minas: Consolidação da cadeia produtiva.

Tolentino, M.A.K.P., Albano, D.R.B., Sevilla, F.B. (2018) Piezoelectric sensor for ethylene based on silver(I)/polymer composite. *Sens. Actuators B: Chem.* 254:299-306.

Valenzuela, J.L., Manzano, S., Palma, F., Carvajal, F., Garrido, D., Jamilena, M. (2017) Oxidative stress associated with chilling injury in immature fruit: postharvest technological and biotechnological solutions. *Int. J. Mol. Sci.* 18(7):1467.

Vasquez-Tello, A., Zuily-Fodil, Y., Thi, A.P., da Silva, J.V. (1990) Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. *J. Exp. Bot.* 41(7):827-832.

Vieites, R.L., Daiuto, É.R., Moraes, M.R.D., Neves, L.C., Carvalho, L.R.D. (2011) Caracterização físico-química, bioquímica e funcional da jabuticaba armazenada sob diferentes temperaturas. *Rev. Bras. Frutic.* 33:362-375.

Vinod, B.R., Asrey, R., Meena, N.K., Sethi, S., Prakash, J., Chawla, G., Menaka, M., Ahamad, S. (2024) Ozonized water treatment enhances quality and storage life of 'Red Lady' papaya fruit during cold storage. *Sci. Hortic.* 328:112859.

Zhang, W., Cao, J., Fan, X., Jiang, W. (2020) Applications of nitric oxide and melatonin in improving postharvest fruit quality and the separate and crosstalk biochemical mechanisms. *Trends Food Sci. Technol.* 99:531-541.

Wang, D., Seymour, G.B. (2022) Molecular and biochemical basis of softening in tomato. *Mol. Hortic.* 2(1):5.

Wu, Q., Li, Z., Chen, X., Yun, Z., Li, T., Jiang, Y. (2019) Comparative metabolites profiling of harvested papaya (*Carica papaya* L.) peel in response to chilling stress. *J. Sci. Food Agric.* 99(15):6868-6881.

Yahia, E.M., Carrillo-López, A. (eds.) (2019) *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables*. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 1–17p.

Zhang, T., Li, W., Xie, R., Xu, L., Zhou, Y., Li, H., Xiaolin, C., Zheng, X., Xiao, L., Liu, K. (2020) CpARF2 and CpEIL1 interact to mediate auxin–ethylene interaction and regulate fruit ripening in papaya. *Plant J.* 103(4):318-337.

Zhu, Q., Zhang, K., Chen, W., Li, X., Zhu, X. (2023) Transcriptomic and metabolomic analyses reveal key factors regulating chilling stress-induced softening disorder in papaya fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 205:112534.

Zuchi, J., Sedyama, C.S., Lacerda Filho, A.F., Reis, M.S., França Neto, J.B., Zanuncio, J.C., Araújo, E.F. (2011) Variação da temperatura de sementes de soja durante o armazenamento. ABRATES 21(3):35-40.