

**INFLUÊNCIA DO CONGELAMENTO E DA IMERSÃO EM ETANOL COMO PRÉ-
TRATAMENTOS NA CINÉTICA DE SECAGEM CONVECTIVA E NOS
PARÂMETROS DE QUALIDADE DO MORANGO**

EVANDRO DE ANDRADE SIQUEIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2025**

INFLUÊNCIA DO CONGELAMENTO E DA IMERSÃO EM ETANOL COMO PRÉ-
TRATAMENTOS NA CINÉTICA DE SECAGEM CONVECTIVA E NOS
PARÂMETROS DE QUALIDADE DO MORANGO

EVANDRO DE ANDRADE SIQUEIRA

“Tese 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 Doutor em Produção Vegetal”

Orientadora: profa. D.Sc. Luana Pereira de Moraes
Coorientador: prof. D.Sc. Leandro Levate Macedo

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S618

Siqueira, Evandro de Andrade.

Influência do congelamento e da imersão em etanol como pré-tratamentos na cinética de secagem convectiva e nos parâmetros de qualidade do morango / Evandro de Andrade Siqueira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

74 f. : il.

Bibliografia: 56 - 74.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.

Orientadora: Luana Pereira de Moraes.

Coorientador: Leandro Levate Macedo.

1. Desidratação. 2. cinética de secagem. 3. compostos bioativos. 4. análise multivariada. 5. conservação de alimentos. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

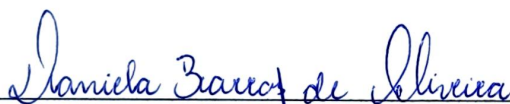
INFLUÊNCIA DO CONGELAMENTO E DA IMERSÃO EM ETANOL COMO PRÉ-
TRATAMENTOS NA CINÉTICA DE SECAGEM CONVECTIVA E NOS
PARÂMETROS DE QUALIDADE DO MORANGO

EVANDRO DE ANDRADE SIQUEIRA

“Tese 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 Doutor em Produção Vegetal”

Aprovada em 21 de agosto de 2025.

Comissão Examinadora:



Profa. Daniela Barros de Oliveira (D.Sc., Química de Produtos Naturais) – UENF



Prof. Daniel Gonçalves (D.Sc., Engenharia de Alimentos) – UENF



Documento assinado digitalmente
CINTIA DA SILVA ARAUJO
Data: 10/10/2025 12:59:13-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Cintia da Silva Araújo (D.Sc., Ciências dos Alimentos) – UFGD



Documento assinado digitalmente
LEANDRO LEVATE MACEDO
Data: 10/10/2025 12:52:34-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Leandro Levate Macedo (D.Sc., Ciências dos Alimentos) – UFGD Coordenador



Profa. Luana Pereira de Moraes (D.Sc., Engenharia de Alimentos) – UENF
Orientadora

Dedico a Deus, à senhora Izaura de Andrade Siqueira (minha mãe, *in memoriam*), à minha esposa Elis Regina Falqueto, à nossa família e ao meu amigo Leandro Levate Macedo.

AGRADECIMENTOS

Mais um ciclo se encerra, e tenho gratidão a Deus por ter me dado força, sabedoria e persistência para concluir mais esta etapa acadêmica; Agradeço à minha mãe, senhora Izaura de Andrade Siqueira (*in memoriam*), que não mediu esforços para me educar e sempre me direcionou aos estudos. À minha esposa, Elis Regina e aos meus filhos pelo amor, dedicação, torcida e compreensão — amo vocês! Agradeço ao Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) por possibilitar, em parceria com a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), este doutorado. Minha gratidão também aos professores da UENF pelos ensinamentos e pelas memórias construídas ao longo desta caminhada, em especial ao professores Bressan e Henrique, à minha orientadora, professora Luana Pereira de Moraes, por ter aceitado orientar-me, pelo apoio e pelas contribuições que me incentivaram a seguir adiante; à Coordenadora do Programa, professora Daniela Barros de Oliveira, pelo estímulo constante; e ao professor Daniel Gonçalves pelas contribuições a este estudo; Expresso um imenso agradecimento ao coorientador e amigo, professor Leandro Macedo, que, guiado por Deus como um verdadeiro anjo, mostrou-me que era possível realizar este estudo, que eu conseguiria vencer e que sou capaz de todas as coisas n'Aquele que nos fortalece (Filipenses 4:13), bem como à professora Cintia Araújo, que, juntamente conosco, contribuiu de forma substancial para a pesquisa desta tese; Agradeço ao Ifes – *campus* Venda Nova do Imigrante, especialmente a Diretora-Geral, Máira de Oliveira, a Eliane Lorete e Fabiano Caliman pela amizade e apoio; à Equipe de Laboratórios e à Diretoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão, nas pessoas de Anderson Vinco, Adriano Hupp e Mauro Sérgio de Sant'Ana; e à equipe do *Coffee Design*, na pessoa de Evandro Messias — todos fundamentais para viabilizar os estudos necessários desta pesquisa; Estendo os agradecimentos ao Ifes – *campus* Ibatiba, na pessoa da Coordenadora de Laboratórios, Paula Amorim, pela contribuição nas análises realizadas neste estudo; O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço, também, à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo suporte ao desenvolvimento deste estudo. Por fim, agradeço à turma do doutorado pelo apoio, incentivo e reflexões ao longo do curso.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO.....	11
OBJETIVOS.....	13
Objetivo Geral	13
Objetivos Específicos	13
REVISÃO DE LITERATURA.....	14
Morango	14
Secagem de alimentos.....	15
Secagem com congelamento	19
Secagem com imersão em etanol	20
MATERIAL E MÉTODOS	23
Preparo da amostra.....	23
Pré-tratamentos	23
Congelamento	24
Imersão em etanol	24
Secagem.....	24
Procedimento	24
Cinética de secagem	25
Modelo de Page.....	25
Parâmetros de qualidade.....	26
Atividade de água	26
Encolhimento	26
Dureza	26
Higroscopicidade.....	27
Cor.....	27
pH e acidez	27

Vitamina C (AA).....	28
Teor de antocianinas totais (TAT)	28
Fenólicos totais (TFT).....	29
Capacidade antioxidante.....	30
Análise estatística	31
Análise de componentes principais.....	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
Secagem.....	33
Cinética de secagem	34
Modelo de Page.....	36
Parâmetros de qualidade.....	37
Atividade de água	39
Encolhimento	40
Dureza	41
Higroscopicidade.....	41
Cor.....	42
pH e acidez	45
Vitamina C, antocianinas totais, fenólicos totais e capacidade antioxidantes	47
Análise de componentes principais (PCA)	50
CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Preparação de amostras de morango, pré-tratamentos com congelamento e etanol, secagem convectiva e análises de qualidade.

Figura 2: Morangos desidratados: Controle (SC), Etanol (PE+SC), Congelamento (C+SC) e Congelamento + Etanol (C+PE+SC).

Figura 3: Cinética da razão de umidade (a), taxa de secagem (b) e tempo de secagem (c) das amostras frescas e pré-tratadas com imersão em etanol e/ou congelamento.

Figura 4: Atividade de água (a), encolhimento (b), dureza (c) e higroscopicidade (d) das amostras.

Figura 5: Parâmetros colorimétricos das amostras.

Figura 6: pH e acidez das amostras.

Figura 7: Vitamina C (AA), antocianinas totais (TAT), fenólicos totais (TFT) e capacidade antioxidantes (CA_{FRAP} e CA_{ABTS}).

Figura 8: Análise de componentes principais (PCA).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição centesimal, minerais e vitaminas do morango

Tabela 2: Características dos métodos de secagem convencionais

Tabela 3: Condições experimentais

Tabela 4: Valores dos parâmetros k e n , coeficiente de determinação (R^2), e erro-padrão da regressão (SER) do modelo de Page

RESUMO

SIQUEIRA, Evandro de Andrade; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; agosto 2025; Influência do congelamento e da imersão em etanol como pré-tratamentos na cinética de secagem convectiva e nos parâmetros de qualidade do morango; Orientadora: D.Sc. Luana Pereira de Moraes; Coorientador: D.Sc. Leandro Levate Macedo.

O morango é uma fruta de alta perecibilidade, o que contribui para grandes perdas pós-colheita. Entre os métodos de conservação, a secagem convectiva se destaca, embora possa causar degradação de compostos bioativos. O presente estudo avaliou a influência do congelamento e da imersão em etanol como pré-tratamentos, de forma isolada e combinada, na cinética de secagem convectiva e nos parâmetros de qualidade do morango. Amostras fatiadas foram submetidas aos pré-tratamentos e secas em desidratador de bandejas a 60°C. Foram avaliados o comportamento de secagem, parâmetros do modelo de Page, atividade de água, encolhimento, dureza, higroscopicidade, cor, pH, acidez, vitamina C, teor de antocianinas, fenólicos totais e capacidade antioxidante. Os resultados mostraram que o pré-tratamento com etanol reduziu em até 20% o tempo de secagem, aumentou significativamente a taxa de secagem e preservou a coloração vermelha intensa (maior valor de a^*). O congelamento isolado resultou em amostras com menor dureza, favorecendo uma textura mais macia, enquanto ambos os pré-tratamentos reduziram a atividade de água para valores entre 0,37 e 0,43, adequados para conservação. No entanto, a combinação dos dois métodos não apresentou efeito sinérgico. O modelo de Page ajustou-se de forma excelente aos dados experimentais ($R^2 \geq 0,994$; $SER \leq 0,025$), evidenciando maior difusividade da água nas amostras pré-tratadas com etanol (k até $1,722 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$), em comparação às amostras sem o solvente (k até $0,917 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$). Quanto à qualidade nutricional, o etanol favoreceu a retenção da vitamina C e dos compostos fenólicos totais, enquanto o congelamento contribuiu para maior preservação das antocianinas. Em conjunto, os tratamentos garantiram boa conservação dos atributos funcionais, ainda que sem sinergismo. Conclui-se que o uso do etanol como pré-tratamento é uma estratégia eficiente para otimizar a secagem convectiva do morango, promovendo redução no tempo de processo, melhor difusividade da água e preservação de compostos bioativos.

Palavras-chave: Desidratação, cinética de secagem, compostos bioativos, análise multivariada, conservação de alimentos.

ABSTRACT

SIQUEIRA, Evandro de Andrade; D.Sc.; State University of Northern Fluminense Darcy Ribeiro; August 2025; Influence of freezing and immersion in ethanol as pretreatments on convective drying kinetics and quality parameters of strawberries; Advisor: D.Sc. Luana Pereira de Moraes; Co-advisor: D.Sc. Leandro Levate Macedo.

Strawberry is a highly perishable fruit, which contributes to significant postharvest losses. Among conservation methods, convective drying stands out, although it may cause degradation of bioactive compounds. The present study evaluated the influence of freezing and ethanol immersion as pre-treatments, individually and combined, on the convective drying kinetics and quality parameters of strawberries. Sliced samples underwent the pre-treatments and were dried in a tray dryer at 60°C. Drying behavior, Page model parameters, water activity, shrinkage, hardness, hygroscopicity, color, pH, acidity, vitamin C, anthocyanin content, total phenolics, and antioxidant capacity were assessed. Results showed that ethanol pre-treatment reduced drying time by up to 20%, significantly increased the drying rate, and preserved the intense red coloration (higher a^* value). Freezing alone resulted in samples with lower hardness, favoring a softer texture, while both pre-treatments reduced water activity to values between 0.37 and 0.43, suitable for preservation. However, the combination of the two methods showed no synergistic effect. The Page model fitted the experimental data excellently ($R^2 \geq 0.994$; $SER \leq 0.025$), evidencing greater water diffusivity in ethanol-treated samples (k up to $1.722 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) compared to samples without the solvent (k up to $0.917 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$). Regarding nutritional quality, ethanol favored the retention of vitamin C and total phenolic compounds, while freezing contributed to greater preservation of anthocyanins. Overall, the treatments ensured good conservation of functional attributes, even without synergism. It is concluded that ethanol pre-treatment is an effective strategy to optimize the convective drying of strawberries, promoting shorter process time, better water diffusivity, and preservation of bioactive compounds.

Keywords: Dehydration, drying kinetics, bioactive compounds, multivariate analysis, food preservation.

INTRODUÇÃO

No cenário mundial, o morango (*Fragaria x ananassa*) se destacou com a produção de cerca de 14,7 milhões de toneladas em 2023, dos quais 86,37% se concentram na China (57,31%), EUA (8,5%), Egito (4,97%), Turquia (4,6%), México (4,36%), Espanha (2,24%), Rússia (1,78%), Polônia (1,32%) e Brasil (1,28%) (FAOSTAT, 2023).

O morango é uma fruta não climatérica, cultivada em regiões temperadas e colhida no estágio maduro (Kumar et al., 2022). Devido a sua textura macia e elevado teor de umidade, tem elevada atividade microbiológica, a qual influencia na alta perecibilidade da fruta (Bhat; Stamminger, 2015). Até 40% dos morangos são perdidos após a colheita, devido a fatores de armazenamento e logística de escoamento, os quais provocam a perda de firmeza, crescimento de microrganismos deteriorantes e dessecação da fruta (Hajji et al., 2018; Qaderi et al., 2023).

Dessa forma, o estudo de processos de conservação se torna importante, como uma alternativa de disponibilidade do produto no mercado com menores índices de perda. Entre os métodos de conservação disponíveis, a secagem convectiva tem demonstrado bons resultados para essa fruta (Macedo et al., 2021b). No entanto, algumas perdas de compostos importantes como antocianinas e compostos fenólicos podem ocorrer nesse processo (Vimercati et al., 2019).

Estudos com pré-tratamentos do morango antes do processo de secagem, têm gerado resultados significativos quanto à redução de tempo no processo de desidratação, bem como na manutenção das propriedades benéficas à saúde. Entre esses métodos estão a utilização do etanol (Macedo et al., 2021b) e utilização de desidratação osmótica assistida por ultrassom (Jiang et al., 2021). No entanto, não foram encontrados na literatura trabalhos com pré-tratamento de congelamento em morangos.

Considerando que o morango tem um valor expressivo no mercado regional e nacional e riqueza em compostos com propriedades antioxidantes, como fenóis e antocianinas, os quais são vantajosos para a saúde, vinculados à diminuição da incidência de várias patologias, incluindo câncer, problemas cardiovasculares, doenças neurodegenerativas e outras condições crônicas (Basu et al., 2014), torna-

se necessário o aprimoramento do processo de secagem, visando minimizar o desperdício e manter suas características físico-químicas.

Nesse contexto, este estudo se propõe a avaliar a influência do congelamento e da imersão em etanol como pré-tratamentos na cinética de secagem convectiva e nos parâmetros de qualidade do morango. Acredita-se que a utilização de pré-tratamentos do congelamento e da imersão em etanol, de forma isolada ou combinada, antes da secagem do morango, possa otimizar o processo de desidratação da fruta, de forma a diminuir os custos de produção e promover a manutenção das propriedades importantes do morango. Assim, para responder o questionamento proposto, apresenta-se a seguir, os objetivos, referencial teórico, material e métodos, resultados e discussão e por fim a conclusão deste estudo.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar a influência dos pré-tratamentos do congelamento e da imersão em etanol na cinética de secagem convectiva e nos parâmetros de qualidade do morango.

Objetivos Específicos

- Verificar o comportamento da secagem convectiva do morango fresco e dos pré-tratados;
- Avaliar a influência dos pré-tratamentos nos parâmetros do modelo de Page;
- Investigar a influência do congelamento na secagem e qualidade do morango;
- Analisar a influência da imersão em etanol na secagem e qualidade do morango;
- Avaliar os efeitos combinados do congelamento e imersão em etanol na secagem e qualidade dos morangos;
- Comparar a secagem e as características de qualidade dos morangos frescos e desidratados.

REVISÃO DE LITERATURA

Morango

O morango é uma fruta de destaque no mundo e no Brasil. Sendo que além do 10º lugar em produção da fruta, o morango brasileiro no ano de 2023 ocupou o 15º lugar em área plantada, com o total de 4.836 ha (FAOSTAT, 2023).

Sabe-se que o morango deve ser colhido no estágio de maturação maduro, o qual corresponde à cor vermelha, a fim de assegurar a boa qualidade, uma vez que é uma fruta não climatérica (Aubert et al., 2021). Além disso, é altamente perecível e tem vida útil curta, devido à sua suscetibilidade aos danos mecânicos e fisiológicos, desenvolvimento microbiológico, reações oxidativas e perda de água (Hajji et al., 2018).

Devido à sua composição nutricional (Tabela 1), o morango possui diversos benefícios à saúde humana, especialmente, devido à baixa caloria e aos diversos minerais, vitaminas, fibras alimentares, proteína, além de antioxidantes, como vitamina C, antocianinas, taninos e flavonóis (Bhat; Stamminger, 2015; Hajji et al., 2018).

Tabela 1: Composição centesimal, minerais e vitaminas do morango.

Umidade	91,5%
Energia	30 kcal
Proteína	0,9 g.100g ⁻¹
Lipídeos	0,3 g.100g ⁻¹
Carboidratos	6,8 g.100g ⁻¹
Fibra alimentar	1,7 g.100g ⁻¹
Cinzas	0,5 g.100g ⁻¹
Cálcio	0,011 g.100g ⁻¹
Magnésio	0,010 g.100g ⁻¹
Manganês	0,00033 g.100g ⁻¹
Fósforo	0,022 g.100g ⁻¹
Ferro	0,0003 g.100g ⁻¹
Sódio	Traços
Potássio	0,184 g.100g ⁻¹
Cobre	0,00006 g.100g ⁻¹

Zinco	0,0002 g.100g ⁻¹
Tiamina	Traços
Riboflavina	0,00003 g.100g ⁻¹
Piridoxina	0,00003 g.100g ⁻¹
Niacina	Traços
Vitamina C	0,0636 g.100g ⁻¹

Fonte: adaptado de TACO (2011).

Assim, diversos estudos têm sido realizados com intuito de otimizar os métodos de conservação do morango, como por exemplo, o uso coberturas comestíveis à base de polissacarídeos (alginato, quitosana e pululana) (Li et al., 2017), revestimento do morango com quitosana e carotenoproteínas (Hajji et al., 2018), tratamento pré-colheita com radiação ultravioleta (UV-C) (Xu et al., 2018, 2019), irradiação com laser de diodo (Ali et al., 2020), embalagens de atmosfera modificada e de atmosfera modificada em equilíbrio (Lei et al., 2022), tratamento pré-colheita com ácido peracético (Yang et al., 2022), utilização de nanomateriais de celulose, de quitosana e alginato de sódio misturados com óleo essencial de orégano (Lee et al., 2022), utilização de ondas eletromagnéticas eletrostáticas (DENBA+) (Yang et al., 2023), suplementação pré-colheita com diodo emissor de luz (LED) (Lauria et al., 2023), congelamento (Kamiloglu, 2019; Qaderi et al., 2023) e secagem (Pellicer et al., 2019; Rodríguez-Ramírez et al., 2021; Macedo et al., 2022a; Santos et al., 2022a).

Secagem de alimentos

A secagem é um dos métodos mais tradicionais de conservação de alimentos, a qual tem por finalidade aumentar a vida útil dos produtos (Adak et al., 2017). Ainda, a secagem é reconhecida com um dos métodos adequados para conservação de frutas, hortaliças e ervas, reduzindo seu tamanho e peso, otimizando assim os custos de embalagem, armazenamento e transporte (Calín-Sánchez et al., 2020).

No processo de secagem ocorre a remoção da água, normalmente conduzida por calor (por evaporação ou sublimação), de produtos sólidos e líquidos, resultando em produtos secos de baixa umidade, retardando o desenvolvimento de microrganismos (bactérias, leveduras e bolores), especialmente do *Fusarium* que se desenvolve com atividade de água em torno de 0,9, temperatura de 20 a 25°C e alta

umidade relativa e impacta significativamente o rendimento e a qualidade dos frutos do morango (Yang et al., 2024).

Além disso, a secagem retarda as reações químicas maléficas aos alimentos, como atividades enzimáticas e não enzimáticas (escurecimento, deterioração etc.) e ainda, promove a retenção de nutrientes, como proteínas, fibras, vitaminas, açúcares e minerais e, compostos bioativos como fenólicos, carotenoides e isoflavonas (Calín-Sánchez et al., 2020; Menon et al., 2020; Mohana et al., 2020).

Diversas técnicas de secagem foram desenvolvidas e utilizadas para desidratar vegetais, sendo as mais convencionais, a secagem convectiva, secagem por pulverização, liofilização, desidratação osmótica e secagem intermitente, sendo suas características, vantagens, desvantagens e aplicações, apresentadas na Tabela 2 (Calín-Sánchez et al., 2020).

Embora as técnicas de secagem contribuam com a conservação dos alimentos, bem como aumentem a vida útil desses produtos, também causam alterações em algumas propriedades, como cor, textura, tamanho, perda de componentes voláteis e nutrientes e, conseqüentemente, pode reduzir a qualidade do produto (Nemzer et al., 2018; Sehrawat et al., 2018).

Na secagem convectiva, a retirada da água do produto acontece por meio da vaporização (ebulição e evaporação), sendo o método mais utilizado, devido a sua flexibilidade, alto rendimento e menor custo de produção (Gamboa-Santos et al., 2014a, 2014b). Geralmente, esse método é realizado com velocidade do ar de 0,1 a 5 m/s e em temperatura do ar entre 50°C e 110°C, causando atenuada degradação da qualidade (física e química) em alimentos secos ao ar quente (Nemzer et al., 2018). Por outro lado, na liofilização a remoção da água acontece por sublimação, processo que ocorre em baixas temperaturas e promove uma melhor qualidade do produto, mas é considerado um método de alto custo operacional (Nemzer et al., 2018).

Tabela 2: Características de alguns métodos de secagem convencionais.

Método de Secagem	Agente Secante	Tipo de Alimentação	Mecanismo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Secagem convectiva	Ar de secagem quente	Sólidos - frutas, vegetais, bagaço de frutas e vegetais	Troca de umidade entre o produto alimentício e o ar quente que flui através da câmara de secagem	Longa vida útil, design simples; Operação fácil; Baixo custo	Alta temperatura do gás de entrada ou gás muito seco; Longo tempo de secagem, exposição à oxidação; Gera sabores estranhos; Formação de crostas na superfície do produto devido às altas temperaturas	Indústria alimentícia; Produtos hortícolas e frutos secos; Processamento de bagaço – produção de ingredientes funcionais
Secagem por pulverização	Gás de secagem quente (geralmente ar)	Líquidos - sucos, purê, soluções, leite vegetal	Transformação de produto líquido em forma de pó seco em operação de processamento de uma etapa	Baixo teor de umidade e produtos de alta qualidade; Prazo de validade longo; Tamanho e forma semelhantes de material seco; Operação contínua Custo mais baixo do que liofilização	Pode levar a perda de compostos bioativos e viscosidade devido à alta temperatura, tamanho do equipamento, produtos com grande teor de gordura requerem um processo de desengorduramento, alto custo de instalação	Produção de pó; Microencapsulação; Produção de pós instantâneos
Liofilização		Todos os tipos de alimentos	Processo de duas etapas: (1) congelamento da água da matéria-prima; (2) aquecimento do sólido congelado para induzir a sublimação da umidade	Previne danos por oxidação; Minimiza alterações de compostos químicos; Encolhimento mínimo e mudança de sólidos solúveis; Retenção de compostos voláteis; Manutenção da estrutura porosa	Custo de instalações muito alto; Processo lento e caro	Produção de compostos sensíveis ao calor, ou seja, vitaminas, culturas microbianas e antibióticos; Produção de produtos de alta qualidade com alto custo final: frutas exóticas, vegetais, ingredientes para sopas, cogumelos e sucos

Desidratação osmótica	Açúcar, soluções de sal (cloreto de sódio), sucos concentrados, soluções de polióis	Frutas vegetais	Redução de umidade por imersão da matéria-prima em uma solução de alta pressão osmótica → transferência de umidade do alimento para a solução impulsionada pela diferença de pressão osmótica	Manutenção dos parâmetros físico-químicos e sensoriais; Quando realizado em sucos concentrados pode melhorar a qualidade do produto	Alto teor de umidade final; Geralmente precisa de secagem posterior; Alto teor de açúcar ou sal no produto quando desidratado; Dificuldade em prever a composição química final quando desidratado em sucos concentrados	Produção de chips de frutas; Produção de frutas secas
Secagem intermitente	Ar quente, potência de micro-ondas, vácuo e infravermelho	Frutas vegetais	O aquecimento intermitente por micro-ondas é conduzido pela aplicação de energia de micro-ondas como pulsos sequenciais, onde a relação de potência tem um papel importante na cinética de secagem	Protege compostos bioativos, cor, textura; reduzir os efeitos de escurecimento e aumentar a vida útil.	Uma relação de potência mais alta pode danificar compostos importantes, como a vitamina C.	Material alimentar à base de plantas; Frutas: kiwi, mamão, banana, goiaba, cenoura etc.

Fonte: Adaptado de Calín-Sánchez et al. (2020).

Embora a secagem possa promover a diminuição da qualidade no processo de desidratação do produto alimentício, na cultura de morango, métodos de secagem têm se mostrado como uma boa alternativa para o processamento da fruta. Dessa forma, diversos métodos têm sido investigados, com intuito de otimizar o tempo de secagem e promover a manutenção ou aumento de propriedades benéficas à saúde, tais como, vitamina C, fenóis totais, antioxidantes e antocianinas, como a secagem por infravermelho (Adak et al., 2017), *spray drying* (Pellicer et al., 2019), secagem em leito de espuma (Guazi et al., 2019), pré-tratamento de desidratação osmótica assistida por ultrassom (Jiang et al., 2021), secagem solar (Rodríguez-Ramírez et al., 2021), pré-tratamento com ultrassom na liofilização a vácuo (Xu et al., 2021; Wang et al., 2022), *cast-tape drying* (Cichella Frabetti et al., 2021) e secagem intermitente por micro-ondas (Macedo et al., 2022a).

Diante do exposto, observa-se que pré-tratamentos têm sido aplicados antes da técnica de secagem do morango. A utilização de pré-tratamentos em frutas e vegetais antes do processo de secagem tem por objetivo encurtar o período de desidratação, melhorar a eficiência energética do processo de secagem e a qualidade dos produtos secos (Feng et al., 2019; Wang et al., 2019).

Secagem com congelamento

Para Rojas e Augusto (2018a), pré-tratamentos de produtos alimentícios antes do processo de secagem, se baseiam na utilização de agentes aceleradores no processo, os quais devem ser biodegradáveis e inofensivos à saúde humana. A aplicação combinada de pré-tratamentos com congelamento e etanol na secagem do cambuci (Rojas et al., 2021) e do mamão (Santos et al., 2022b), reduziram o tempo de secagem em 36% e 48%, respectivamente e, no caso do mamão desidratado, a técnica empregada minimizou as perdas de compostos fenólicos.

O congelamento é uma técnica simples, comum, eficiente e menos deletério para conservação e estocagem de vegetais e frutas a longo prazo, preservando a qualidade, especialmente, nutrientes e compostos bioativos do produto fresco, bem como contribui para a manutenção da renda do produtor, uma vez que alimentos frescos nem sempre estão disponíveis na cadeia de abastecimento (Qaderi et al., 2023).

No congelamento, a estrutura celular do alimento é gradativamente rompida, logo as células apresentam formato irregular, permanecendo locais com poros no

interior do tecido, devido ao surgimento de cristais de gelo e, assim, essa porosidade facilita a remoção da água durante a secagem, uma vez que a água líquida e o vapor presentes no interior do produto são facilmente liberados por meio da vaporização (Tatemoto et al., 2016; Rojas et al., 2021). Esse fenômeno foi verificado na beterraba, maçã e berinjela (Vallespir et al., 2018).

Portanto, considera-se a taxa de congelamento como elemento primordial para comparar a velocidade do processo de formação de cristais de gelo e determinar o número e tamanho desses cristais e, assim, essa taxa mais vertiginosa promove a uma quantidade maior de cristais de gelo com tamanho menor e distribuição mais homogênea, o que contribui com menores modificações internas na estrutura dos alimentos congelados (Li et al., 2018; Dalvi-Isfahan et al., 2019).

No entanto, apesar dos benefícios gerados pelo congelamento quanto à preservação e armazenagem dos alimentos, Dalvi-Isfahan et al. (2019) revelam que esse método pode provocar diversos efeitos maléficos aos produtos, como, danos mecânicos, queimaduras por congelamento, recristalização e crioconcentração (concentração de congelamento) e, por consequência, esses fenômenos podem causar paralização dos sistemas metabólicos, danos à membrana celular, deslocamento dos sistemas enzimáticos e, ocasionalmente, destruição das células.

Embora deva-se atenção ao processo de congelamento, estudos anteriores demonstram que alimentos pré-tratados por essa técnica, tem alcançado redução no tempo de secagem, como, em cenouras (Tatemoto et al., 2016; Ando et al., 2019), beterraba, maçã e beringela (Vallespir et al., 2018) e lúpulo (Addo et al., 2022).

Por fim, na cultura do morango, Kamiloglu (2019) ao investigar a influência de métodos de congelamento na bioacessibilidade dos polifenóis do morango constatou que o congelamento retém os compostos bioativos, bem como pode expandir as quantidades totais de antocianinas bioacessíveis.

Por outro lado, dependendo do processo de congelamento efetuado nas frutas, a atividade microbiológica e enzimática pode influir na composição química, porém, a relação da temperatura e período de armazenamento também podem influenciar a composição química do morango (Qaderi et al., 2023).

Secagem com imersão em etanol

Em alguns pré-tratamentos, solventes orgânicos de baixa temperatura de ebulição, como etanol, isopropanol e acetato de etila, têm sido adicionados ao produto

úmido por meio da imersão (Rojas; Augusto, 2018a, 2018b; Wang et al., 2019), aspersão durante o processo de secagem, modificando a composição do ar atmosférico (Braga et al., 2009, 2010; Santos; Silva, 2009) ou gotejamento sob a superfície da matriz alimentar (Corrêa et al., 2012; Silva et al., 2018). Assim, devido à mistura binária de líquidos voláteis como esses tipos de solvente com água levam à redução do ponto de ebulição da água.

Dessa forma, o método de pré-tratamento com etanol tem sido utilizado antes da secagem de alimentos, por ser um solvente de baixo custo e não tóxico, bem como por ter aplicação simples e eficiente, promovendo alterações estruturais e mecanismos físicos que potencializam a secagem (Tatemoto et al., 2015; Guedes et al., 2021). Logo, o pré-tratamento com etanol baseia-se em sua capacidade de dissipar componentes da parede celular, ocasionando modificações na estrutura e aumentando sua permeabilidade (Wang et al., 2019).

Assim, por meio dessa permeabilidade provocada pelo etanol, o transporte da água do alimento tende a amplificar no processo de secagem, devido à produção de um gradiente de tensão superficial entre o etanol e a água disponível no alimento, sendo esse fenômeno denominado de Efeito Marangoni (Rojas et al., 2019). Logo, esse efeito promove maior extração de água do produto e, por consequência, minimiza consideravelmente o tempo de secagem, diminuindo a exposição do alimento em altas temperaturas e, assim, maximiza a retenção dos compostos bioativos e protege o produto de reações oxidativas, auxiliando na manutenção de vitaminas e minerais (Wang et al., 2019; Llavata et al., 2020).

Estudos anteriores têm apresentado resultados interessantes com relação ao pré-tratamento com etanol em alimentos antes da desidratação em secagem convectiva da abóbora (Rojas; Augusto, 2018a; Rojas et al., 2020b), batata (Guedes et al., 2021), uvaia (Gomes et al., 2022), secagem convectiva assistida por ultrassom da maçã (Rojas et al., 2020a), abacaxi (Carvalho et al., 2021), cenoura (Santos et al., 2021), banana (Granella et al., 2022), secagem por infravermelho da batata (Rojas; Augusto, 2018b; Rojas et al., 2019) e secagem em leito de espuma da pitaya (Araújo et al., 2020).

Do mesmo modo, a técnica do pré-tratamento com etanol antes da secagem tem sido aplicada ao morango com resultados significativos, para a secagem convectiva (Macedo et al., 2021b) e secagem convectiva assistida por ultrassom

(Santos et al., 2022a). No entanto, até o presente momento, é inédita a combinação de ambos os pré-tratamentos (congelamento e etanol) na secagem de morangos.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparo da amostra

Os frutos maduros foram adquiridos no mercado local de Venda Nova do Imigrante, município da Região Sudoeste Serrana, do estado do Espírito Santo. Inicialmente, foram visualmente selecionados quanto a integridade (sem injúrias), cor (com predominância vermelha na casca) e estágio de maturação maduro (Macedo et al., 2021b). Em seguida, os frutos foram sanitizados com solução de hipoclorito de sódio (200 mg L^{-1} de cloro livre) por 10 minutos para desinfecção e enxaguados em água corrente. Logo, foram cortados em fatias de 5 mm de espessura (Figura 1), com auxílio de uma lâmina inox.

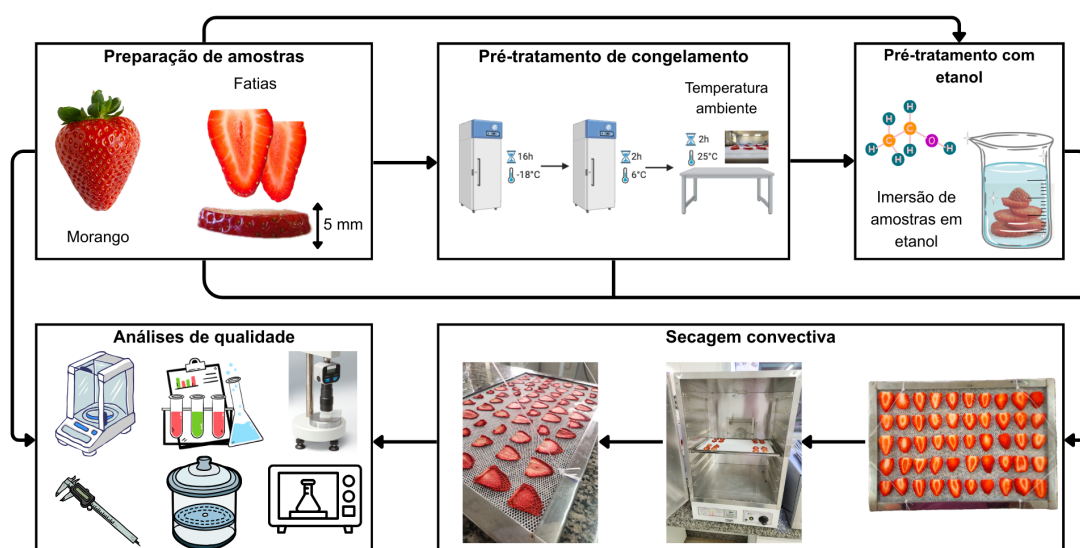


Figura 1: Preparação de amostras de morango, pré-tratamentos com congelamento e etanol, secagem convectiva e análises de qualidade.

Pré-tratamentos

As amostras (fatias) foram submetidas a distintos pré-tratamentos antes da secagem, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Condições experimentais

	Código	Etanol	Congelamento	Secagem
Fresco	(Fresco)	Não	Não	Não

Controle	(SC)	Não	Não	Sim
Etanol	(PE+SC)	Sim	Não	Sim
Congelado	(C+SC)	Não	Sim	Sim
Congelado + Etanol	(C+PE+SC)	Sim	Sim	Sim

Fonte: o autor.

Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

Congelamento

No processo de congelamento, as fatias dos morangos foram acondicionadas em bandejas plásticas com tampa e colocadas em um freezer convencional (Consul, CVU26, Joinville/SC, Brasil) a -18°C por 16 horas. Posteriormente, foram descongeladas e mantidas na embalagem sob refrigeração a 6°C por 2 horas. Por fim, as amostras foram colocadas à temperatura ambiente (25°C por 2 horas) antes do processo de secagem (Santos et al., 2022b).

Imersão em etanol

As amostras fatiadas frescas e descongeladas foram pré-tratadas com etanol antes do processo de secagem. O pré-tratamento com etanol foi realizado pela imersão das amostras em álcool de cereais 95% (vv^{-1}), na proporção de 1:5 (wv^{-1}), por 2min, a 25°C , conforme metodologia proposta por Macedo et al. (2021b).

Secagem

Procedimento

A secagem das fatias (5 mm de espessura) foi realizada em três repetições para quatro condições experimentais, totalizando doze unidades experimentais. Cada repetição utilizou, em média, 240 g de amostra, as quais foram distribuídas uniformemente em bandeja com dimensões de 29 x 41,8 cm, em plástico próprio para alimento e bordas em aço inox.

A bandeja foi inserida em um desidratador de bandejas com sistema de ventilação forçada (Marca Pardal, modelo PE14 Junior Analógico, Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil), com velocidade constante de 1,5 m/s, a 60°C.

Cinética de secagem

A razão de umidade (MR) das amostras durante a secagem foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: X_0 , X_t , e X_e representam a umidade base seca (kg água kg amostra $d.b.^{-1}$) no tempo inicial t e no estágio de equilíbrio, respectivamente.

A determinação do teor de umidade foi realizada utilizando o método gravimétrico, de acordo com *Association of Official Agricultural Chemists* (AOAC - Association of Official Agricultural Chemists, 2016), no qual as amostras foram pesadas e submetidas a uma temperatura de 105°C em estufa de esterilização (Solab, SL100, Piracicaba, Brasil) até o peso constante, por um período de 24 horas. A taxa de secagem, foi determinada de acordo com a Equação 2, utilizando o teor de umidade em base seca (Macedo et al., 2021b).

$$DR = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde: DR é a taxa de secagem, $X_t - X_{t+\Delta t}$ referem-se ao teor de umidade (kg água kg sólido seco⁻¹) em t e $t + \Delta t$, respectivamente, t é o tempo (min) e Δt é a diferença de tempo (min).

A perda de massa foi registrada usando uma balança digital de precisão de 0,001g (Weblabor, S2202, Piracicaba/SP, Brasil). Desta forma, os intervalos de 15 minutos foram adotados para registro do peso das amostras, até o peso constante.

Modelo de Page

O modelo de Page, conforme mostrado na Equação 3, tem sido amplamente utilizado para descrever a cinética de secagem, demonstrando boa concordância com dados experimentais em vários estudos (Rojas; Augusto 2018b; Rojas et al., 2020b).

$$MR = e^{-kt^n} \quad (\text{Eq.3})$$

Onde: MR refere-se à taxa de umidade; t denota o tempo de secagem em minutos; k representa a constante da taxa de secagem (min^{-1}); e n é um parâmetro adimensional associado ao processo de secagem.

Parâmetros de qualidade

As amostras frescas e secas foram caracterizadas quanto à atividade de água, encolhimento, dureza, higroscopicidade, cor, pH e acidez, vitamina C, teor de antocianinas totais, fenólicos totais e capacidade antioxidante.

Atividade de água

A atividade de água (a_w) das amostras foi determinada em um higrômetro eletrônico (Aqualab, série 3TE, Washington, EUA), a 25°C.

Encolhimento

As espessuras das amostras (frescas e desidratadas) foram determinadas com auxílio de um Paquímetro Digital (Western, DC-60, Zhejiang, China), (Junqueira et al., 2017). O encolhimento foi calculado pela relação da espessura, de acordo com a Equação 4.

$$\text{Encolhimento}(\%) = \left(1 - \frac{L}{L_0}\right) \times 100 \quad (\text{Eq.4})$$

Onde: L e L_0 representam a espessura (mm) das amostras desidratadas e frescas, respectivamente.

Dureza

Com base no estudo de Macedo et al. (2022a), a dureza foi determinada por meio de um analisador de textura (Stable Micro Systems, TA-X2T, Surrey, Inglaterra), provido com célula de carga de 50 kg, sonda de 6 mm de diâmetro, velocidade de teste de 2 mm s^{-1} e distância de penetração de 3 milímetros, cuja resposta foi apresentada em Newton (N).

Higroscopicidade

A higroscopicidade do material seco foi determinada colocando, aproximadamente, 1,0 g de amostra em um dessecador contendo solução saturada de cloreto de sódio (75% de umidade) a 25°C por 7 dias. Em seguida, a amostra foi pesada e a higroscopicidade foi calculada a partir da diferença de peso da amostra, expressa em % (gramas de umidade absorvida por 100 g de sólido seco) (Sette et al., 2016; Macedo et al., 2021b).

Cor

A coloração dos morangos foi determinada por meio de análise instrumental, utilizando um colorímetro portátil CR-10 (Konica Minolta, Osaka, Japão), com iluminante padrão D65 e sistema de medição baseado na escala CIELab. Para cada amostra, foram realizadas leituras das coordenadas L^* (luminosidade), a^* (tonalidade do eixo vermelho-verde) e b^* (tonalidade do eixo amarelo-azul). A partir desses valores, foram calculados o croma (C^*), indicando a saturação da cor, e o ângulo de matiz (h°), que expressa a tonalidade predominante da coloração. A variação total de cor (ΔE) em relação à amostra fresca foi calculada utilizando a Equação 5.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde: subscritos “0” referem-se aos valores da amostra fresca.

Todas as medições foram feitas em triplicata e em diferentes pontos da superfície das amostras, de forma a garantir a representatividade.

pH e acidez

As medições de pH e acidez das amostras de morango foram realizadas com base em protocolos para frutas frescas e processadas. O pH foi determinado por leitura direta em potenciômetro digital previamente calibrado (Quimis, Diadema, Brasil), utilizando-se aproximadamente 10 g da amostra triturada diluída em 100 mL de água destilada, sob agitação constante. A leitura foi feita após estabilização do eletrodo, à temperatura ambiente.

A acidez, por sua vez, foi quantificada expressando-se os resultados em equivalente de ácido cítrico, conforme padronização para frutas ácidas. Para isso, 10 mL do extrato obtido da amostra diluída foram titulados com solução de NaOH 0,1

$\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, sob agitação constante, até pH 8,1. O volume consumido foi anotado, e a acidez expressa em % de ácido cítrico, conforme a Equação 6.

$$\text{Acidez (\%)} = \frac{V_{\text{NaOH}} \times N_{\text{NaOH}} \times \text{ME}}{m \text{ amostra}} \times 100 \quad (\text{Eq.6})$$

Onde: V_{NaOH} é o volume consumido (mL), N_{NaOH} a normalidade da solução titulante e ME o equivalente grama do ácido cítrico ($0,064 \text{ g}\cdot\text{mmol}^{-1}$).

Vitamina C (AA)

A quantificação da vitamina C foi realizada por meio de titulação com 2,6-diclorofenolindofenol (DCFI), método reconhecido por sua simplicidade, sensibilidade e aplicabilidade em matrizes alimentares frescas ou processadas. Inicialmente, cerca de 10 g de amostra foram homogeneizados em solução de ácido oxálico 2% (m/v), utilizada como agente extrator e estabilizante, prevenindo a oxidação da vitamina C durante a análise. A solução foi filtrada em papel qualitativo e mantida sob refrigeração até o momento da titulação.

A titulação foi conduzida com a solução padrão de DCFI 0,01% (m/v), previamente padronizada com vitamina C pura. O ponto final foi determinado visualmente pela viragem da coloração rosada persistente por, no mínimo, 30 segundos. Os resultados foram expressos em miligramas de vitamina C por 100 g de amostra fresca.

Este método é eficaz para alimentos ricos em vitamina C, especialmente quando aliado ao uso de ácido oxálico para minimizar interferências oxidativas (Seke et al., 2023). Diversos estudos recentes com morangos e frutas vermelhas aplicam esta metodologia para monitorar perdas de vitamina C em função de tratamentos térmicos, tempo de estocagem ou pré-tratamentos químicos (Uribe et al., 2024; Cengiz et al., 2025).

Teor de antocianinas totais (TAT)

A quantificação das antocianinas totais foi realizada pelo método espectrofotométrico do pH diferencial, reconhecido por sua especificidade e ampla aplicação em alimentos ricos em pigmentos fenólicos. A extração foi conduzida utilizando uma mistura de etanol: ácido clorídrico 0,01% (85:15, v/v), aplicada à amostra previamente triturada. Após homogeneização e repouso sob refrigeração, o

extrato foi filtrado e dividido em duas alíquotas, diluídas separadamente em tampões com pH 1,0 (ácido clorídrico 0,025 M) e pH 4,5 (acetato de sódio 0,4 M).

As leituras de absorbância foram realizadas nos comprimentos de onda de 520 nm e 700 nm, sendo os resultados expressos como equivalente de cianidina-3-glicosídeo (mg/100 g de amostra), de acordo com a Equação 7.

$$TAT = \frac{(A_{520} - A_{700})_{pH1,0} - (A_{520} - A_{700})_{pH4,5} \times PM \times DF \times 1000}{\epsilon \times l} \quad (Eq.7)$$

Em que: PM = peso molecular da cianidina-3-glicosídeo (449,2 g/mol); DF = fator de diluição; ϵ = coeficiente de absorção molar (26.900 L·mol⁻¹·cm⁻¹); l = caminho óptico (1 cm).

Este método é indicado pela sua sensibilidade e seletividade, sendo amplamente validado para frutas pigmentadas como morangos, mirtilos e amoras, devido à capacidade de distinguir formas estruturais das antocianinas em diferentes condições de pH. Estudos recentes demonstram que esse procedimento fornece estimativas confiáveis do conteúdo de pigmentos mesmo após processos de secagem ou armazenamento prolongado (Seke et al., 2023; Jaśkiewicz et al., 2025; Dong et al., 2025).

Fenólicos totais (TFT)

A quantificação dos compostos fenólicos totais (TFT) foi realizada por meio do método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, utilizado na avaliação da atividade antioxidante de frutas e vegetais. Para a extração, aproximadamente 5 g de amostra foram homogeneizados com solução de etanol: água (80:20, v/v) e submetidos à agitação em banho ultrassônico por 30 minutos, sob temperatura controlada. O extrato foi centrifugado e o sobrenadante coletado para análise (Macedo et al., 2021b).

Em tubos de ensaio, foram adicionados 0,5 mL do extrato, 2,5 mL de reagente de Folin-Ciocalteu (diluído 1:10) e, após 5 minutos, 2,0 mL de solução de carbonato de sódio a 7,5%. A mistura foi incubada em banho-maria a 40°C por 30 minutos, e a absorbância foi lida em 765 nm. Os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico (mg EAG·100 g⁻¹) com base em curva padrão (Macedo et al., 2021b).

Este método tem sido utilizado em estudos com frutas pigmentadas, como morangos, por sua sensibilidade à variedade de compostos fenólicos presentes,

incluindo flavonoides, ácidos fenólicos e taninos hidrossolúveis. Aplicações similares foram observadas em investigações recentes sobre frutas vermelhas secas, confirmando sua adequação para amostras submetidas a diferentes condições de processamento térmico (Seke et al., 2023; Dong et al., 2025; Jaśkiewicz et al., 2025).

Capacidade antioxidante

A capacidade antioxidante dos morangos foi determinada por dois métodos espectrofotométricos complementares e amplamente utilizados: o ensaio FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*) e o método ABTS (2,2-azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfonato)). Ambos os métodos foram selecionados por fornecerem informações complementares sobre os mecanismos antioxidantes: enquanto o FRAP avalia a capacidade de redução de íons férricos, o ABTS mede a capacidade de sequestrar radicais livres em meio aquoso e lipofílico.

Para o método FRAP, a solução reagente foi preparada misturando-se tampão de ácido acético (300 mM, pH 3,6), TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil)-1,3,5-triazina, 10 mM) e $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (20 mM) na proporção 10:1:1 (v/v/v), e aquecida a 37°C antes do uso. Uma alíquota de 100 µL do extrato da amostra foi adicionada a 3,0 mL do reagente FRAP. Após 30 minutos de incubação em banho-maria a 37°C, a absorbância foi lida a 593 nm. Os resultados foram expressos como µmol de equivalentes de Trolox por 100 g de amostra fresca (µmol TE·100 g⁻¹) (Khatun et al., 2024; Dong et al., 2025).

No ensaio ABTS, a geração do radical catiônico ABTS⁺ foi realizada pela reação de ABTS (7 mM) com persulfato de potássio (2,45 mM), incubado por 12 a 16 horas no escuro, a 25°C. A solução estoque foi diluída até apresentar absorbância de $0,70 \pm 0,02$ a 734 nm. A mistura reacional consistiu em 30 µL do extrato e 3,0 mL da solução de ABTS⁺, com leitura após 6 minutos. Os resultados também foram expressos em µmol TE·100 g⁻¹, com base na curva padrão de Trolox (Seke et al., 2023).

Estes métodos foram escolhidos pela sua reconhecida aplicabilidade na avaliação funcional de frutas vermelhas submetidas a tratamentos térmicos ou osmóticos. Ambos têm sido utilizados em pesquisas que investigam os efeitos da secagem convectiva, pré-tratamentos com etanol, e congelamento na retenção da atividade antioxidante de compostos bioativos, especialmente antocianinas e ácidos fenólicos (Cengiz et al., 2025; Jaśkiewicz et al., 2025).

Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial (2×2) e três repetições. Os dados das análises de qualidade foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste Tukey. O teste de Dunnett foi utilizado para comparar a amostra fresca com cada tratamento, individualmente.

As análises estatísticas foram realizadas ao nível de 5% de probabilidade de erro, com o auxílio do software Statistica (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

Análise de componentes principais

A análise multivariada dos dados experimentais foi realizada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA – *Principal Component Analysis*), com o objetivo de identificar os padrões de variação entre os tratamentos aplicados aos morangos e compreender as inter-relações entre as variáveis físico-químicas e funcionais avaliadas. Essa técnica permite a redução da dimensionalidade dos dados, facilitando a visualização de agrupamentos, correlações e variáveis discriminantes.

Os dados foram submetidos à padronização z-score (média = 0; desvio-padrão = 1), seguida da construção de uma matriz de correlação. Os componentes principais foram extraídos com base nos autovalores (*eigenvalues*), retendo-se aqueles superiores a 1, conforme o critério de Kaiser. Os gráficos de *scores* (amostras) e *loadings* (variáveis) dos dois primeiros componentes principais foram utilizados para interpretação dos padrões. As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software Statistica (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

A PCA tem sido aplicada na análise de frutas desidratadas, incluindo morangos, para identificar agrupamentos baseados em características como retenção de compostos bioativos, cor, pH e acidez (Dong et al., 2025; Jaśkiewicz et al., 2025). Tal abordagem se mostra eficaz na diferenciação de métodos de secagem e pré-tratamento em função de seu impacto sobre os parâmetros nutricionais e antioxidantes das frutas (Seke et al., 2023).

Estudos recentes com morangos demonstram que a PCA permite evidenciar relações entre perda de compostos fenólicos e variações de cor durante o processamento térmico, reforçando seu valor como ferramenta analítica para

interpretação integrada de dados químicos e funcionais (Uribe et al., 2024; Cengiz et al., 2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras dos morangos desidratados, conforme cada tratamento, são apresentadas na Figura 2.

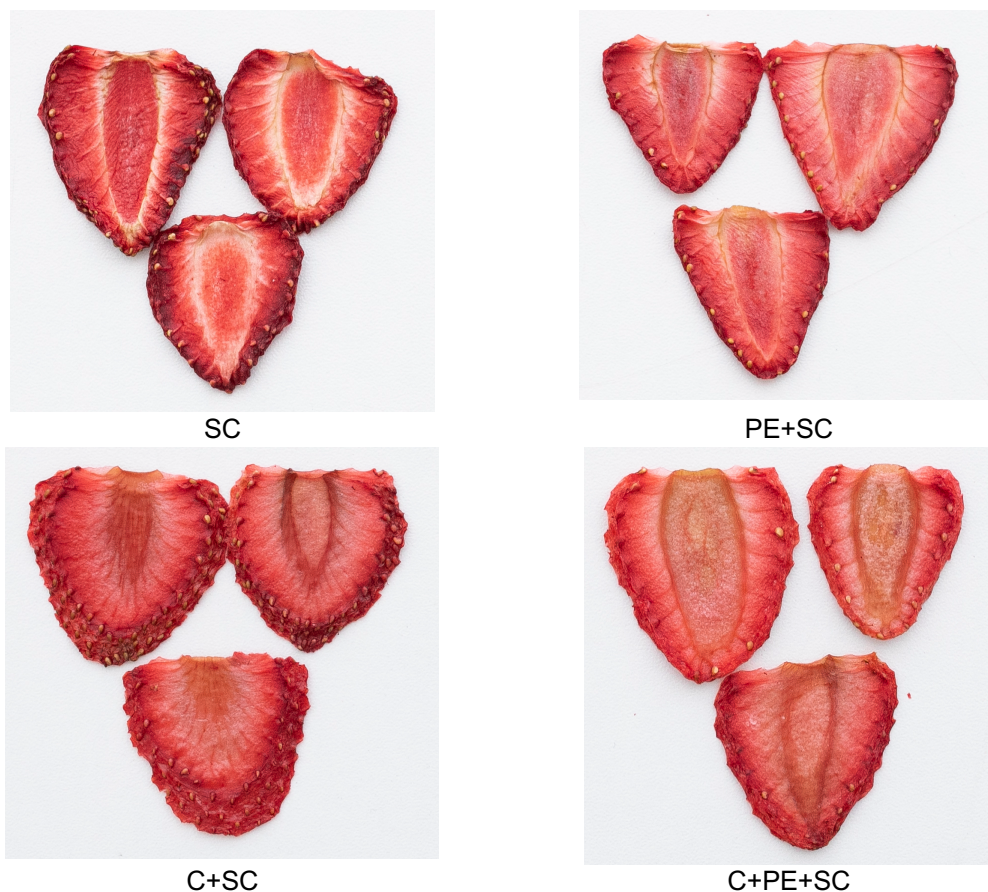


Figura 2: Controle (SC), Etanol (PE+SC), Congelado (C+SC) e Congelado + Etanol (C+PE+SC).

Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

Secagem

Cinética de secagem

As curvas de razão de umidade, taxa de secagem e tempo de secagem são apresentados na Figura 3.

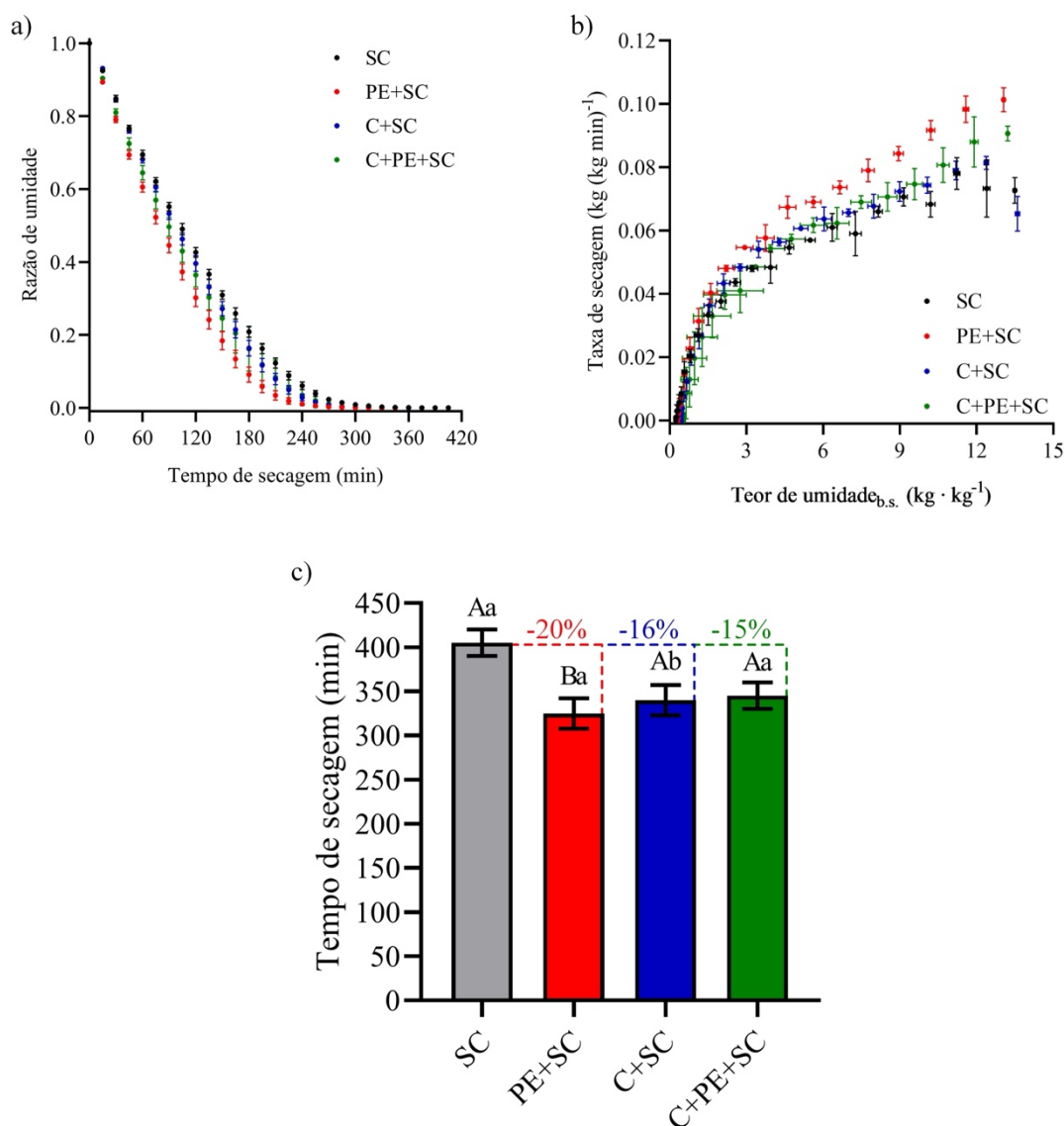


Figura 3: Cinética da razão de umidade (a), taxa de secagem (b) e tempo de secagem (c) das amostras frescas e pré-tratadas com imersão em etanol e/ou congelamento.

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre as condições de congelamento (sim/não) e letras maiúsculas indicam diferenças entre o pré-tratamento com etanol (sim/não), de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$).

Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

As reduções da razão de umidade do morango ocorreram mais intensamente nos estágios iniciais durante o processo de secagem (Figura 3a). Logo, observa-se que o tratamento PE+SC promoveu a melhor redução da proporção de umidade, ou seja, independentemente do valor da razão de umidade, este tratamento foi mais eficiente do que os demais.

Os morangos frescos e pré-tratados com imersão em etanol e de congelamento, de forma isolada ou combinada, tinham um teor de umidade de $93,58 \pm 0,74\%$. Ao final do processo de desidratação esse percentual foi de $21,15 \pm 2,76\%$. Assim mostram que, inicialmente, esses resultados são característicos de secagem convectiva de frutas (Rojas; Augusto, 2018b; Vimercati et al., 2019; Macedo et al., 2021b, 2022b).

Na Figura 3b é apresentado o comportamento da taxa de secagem em relação ao teor de umidade para todos os tratamentos. As amostras pré-tratadas com imersão em etanol (PE+SC) e combinada com congelamento (C+PE+SC) apresentaram maior taxa de secagem quando comparadas com as amostras frescas (SC) e pré-tratadas apenas com congelamento (C+SC). Este resultado se deve ao fato de que a água livre é removida mais facilmente com imersão em etanol.

Já a Figura 3c expressa o tempo de secagem de todos os tratamentos, sendo que foi necessário para finalizar a secagem de 325 a 405min. Observou-se que a amostra pré-tratada com etanol obteve maior redução de tempo (-20%) durante a desidratação em relação ao material fresco desidratado (SC), uma vez que o etanol facilita o transporte e a evaporação da água. Assim, este estudo revela que o uso do etanol como pré-tratamento para secagem convectiva foi eficiente na redução do tempo de desidratação do material e, conseqüentemente, do consumo total de energia (Rojas et al., 2020a).

Logo, esta evidência pode ser aplicada pelos produtores e/ou indústria alimentícia como medida de conservação do produto e fonte de renda, uma vez que o morango desidratado pode ser utilizado como cereal, sobremesas, sorvetes, bolos, iogurtes e outras aplicações, bem como a metodologia empregada neste trabalho é, relativamente, de baixo custo.

A aplicação de solventes orgânicos sobre superfícies de materiais úmidos apresenta benefícios significativos para processos de secagem, pois ocorre a redução

do calor de vaporização da água, o que facilita a remoção deste componente essencial. A rápida evaporação da água superficial promove a abertura de poros, permitindo o deslocamento mais eficiente da água presente no interior do produto. Além disso, o uso de solventes orgânicos favorece o aumento da mobilidade da água nos alimentos, beneficiado pelo efeito Marangoni, que facilita o transporte de líquidos em interfaces, otimizando assim os processos de secagem em diferentes aplicações industriais e agrícolas (Araújo et al., 2020; Rojas et al., 2020a; Carvalho et al., 2021; Macedo et al., 2021b).

Com relação ao pré-tratamento por congelamento (F), conforme descrito por Tatemoto et al. (2016), ocorre a ruptura da parede celular do produto, facilitando a liberação da água líquida e do vapor que são vaporizados dentro da fruta. Assim, o trabalho de Zhang et al. (2024) revela que o uso do congelamento como pré-tratamento em morangos, reduziu o tempo de secagem por infravermelho combinada com ar quente em 33%, diferentemente do resultado deste estudo, o qual a redução do tempo de secagem convectiva foi de 16%.

De acordo com Miano et al. (2021), os efeitos do pré-tratamento com etanol (ET) na redução do tempo de secagem dependem do tempo de pré-tratamento, da estrutura da matriz alimentar, da concentração de ET utilizada, da proporção amostra/ET e da temperatura.

Modelo de Page

O resultado do ajuste do modelo de Page aos dados experimentais da cinética de secagem é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Valores dos parâmetros k e n , coeficiente de determinação (R^2), e erro-padrão da regressão (SER) do modelo de Page.

Parâmetros	Congelamento	Etanol	
		Não	Sim
$k (\times 10^3)$	Não	0.917±0.075 Ba	1.722±0.074 Aa
	Sim	0.770±0.042 Ba	1.527±0.105 Aa
N	Não	1.442±0.008 Ab	1.382±0.004 Ba
	Sim	1.498±0.000 Aa	1.372±0.037 Ba
R^2	Não	0.996±0.000	0.995±0.000
	Sim	0.995±0.001	0.994±0.001
SER	Não	0.022±0.001	0.022±0.001
	Sim	0.024±0.001	0.025±0.001

Os valores são média $\pm$ desvio-padrão. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre as condições de congelamento (sim/não) e letras maiúsculas indicam diferenças entre o pré-tratamento com etanol (sim/não), de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$).

O modelo de Page demonstrou excelente ajuste aos dados experimentais, evidenciando uma capacidade satisfatória de representar a cinética de secagem das amostras. Isso é indicado pelos altos valores do coeficiente de determinação (R^2) e pelo baixo erro-padrão da regressão (SER), com valores de R^2 iguais ou superiores a 0,994 e SER iguais ou inferiores a 0,025. A precisão do modelo de Page, comprovada em diversos estudos e no presente trabalho, fez com que este se tornasse um dos modelos mais utilizados para descrever a cinética de secagem de frutas (Rojas et al., 2020a; Macedo et al., 2021b; Santos et al., 2022a).

Neste estudo, observou-se que as amostras pré-tratadas com etanol apresentaram um valor maior do parâmetro k em comparação com as amostras sem pré-tratamento. Isso indica que o etanol, como solvente orgânico, promove uma maior difusividade da água. O etanol acelera a migração da água do interior do produto para a superfície, facilitando sua evaporação devido à ação da temperatura e do fluxo de ar.

Por outro lado, verificou-se também que as amostras pré-tratadas com congelamento não apresentaram diferença significativa para esse parâmetro, entre as médias dos tratamentos. Isso revela que o congelamento, como pré-tratamento, não promove maior difusividade da água.

Parâmetros de qualidade

As amostras frescas e secas foram caracterizadas quanto à atividade de água, encolhimento, dureza, higroscopicidade (Figura 4), cor (Figura 5), pH e acidez (Figura 6), vitamina C, teor de antocianinas totais, fenólicos totais e capacidade antioxidante (Figura 7).

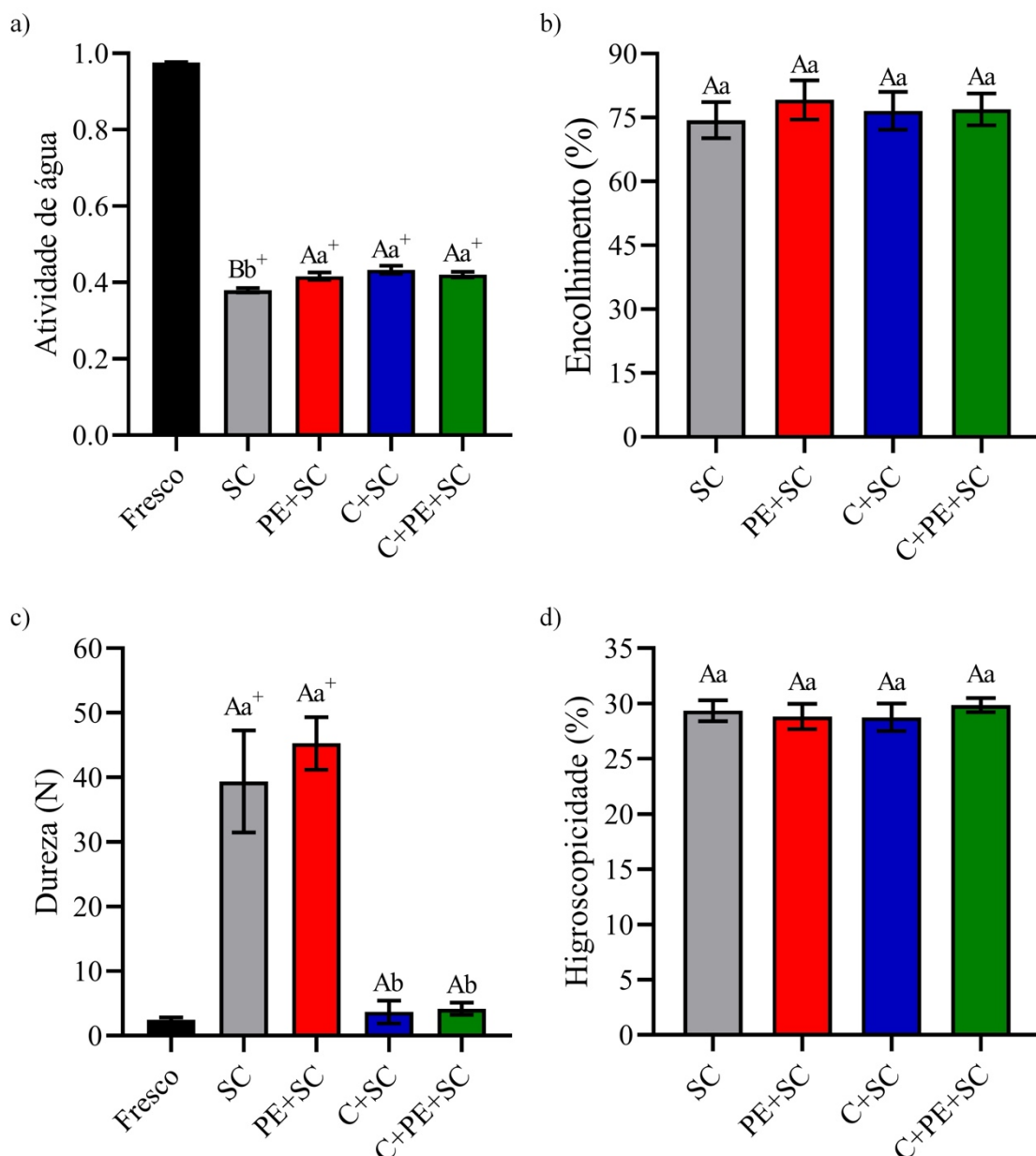


Figura 4: Atividade de água (a), encolhimento (b), dureza (c) e higroscopicidade (d) das amostras.

Os valores são média $\pm$ desvio-padrão $n = 3$. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre as condições de congelamento (sim/não) e letras maiúsculas indicam diferenças entre o pré-tratamento com etanol (sim/não), de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). O sinal positivo (*) indica diferença significativa entre cada tratamento e a amostra fresca, pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

Atividade de água

O valor de a_w do morango fresco foi de $0,9759 \pm 0,0014$, conforme demonstrado na Figura 4a. Estudos anteriores também relataram valores similares (Dermesonlouoglou et al., 2016; Tylewicz et al., 2020; Macedo et al., 2022b;). O elevado valor de a_w contribui para a alta perecibilidade do morango, em conjunto com sua textura macia e alto nível de respiração (Baicu; Popa, 2018), o que justifica a utilização de tecnologias para prolongar a vida útil desta fruta (Bhat; Stamminger, 2015).

A secagem convectiva reduziu de maneira significativa a atividade de água (a_w) das amostras (Figura 4a). As amostras secas apresentaram valores de a_w entre 0,3796 e 0,4332, ou seja, inferiores ao valor de segurança de 0,6, nível no qual a viabilidade do crescimento de microrganismos é muito baixa. Segundo Jay et al. (2005), a deterioração microbiana em alimentos secos, inferior ou abaixo desse valor, é pouco provável por até dois anos.

No entanto, um valor baixo de a_w não assegura que o alimento seja completamente seguro microbiologicamente, conforme discutido por Chitrakar et al., (2019). É importante adotar as precauções necessárias para evitar a contaminação do material, garantindo que o processo de secagem, armazenamento e transporte até a comercialização ocorra em condições higiênicas. Caso contrário, patógenos, leveduras e bolores podem continuar a crescer nos alimentos secos.

Além de aumentar a vida útil, a secagem de frutas diminui as exigências de embalagem e o peso para transporte (Alp; Bulantekin, 2021). Em síntese, uma baixa a_w funciona como uma barreira ao crescimento de microrganismos e contribui de forma significativa para a conservação do produto.

O resultado deste estudo mostra que a não aplicação de pré-tratamento antes da secagem, reduziu a atividade de água. Assim, a amostra fresca desidratada (SC) apresentou valor de a_w inferior e com diferença significativa aos materiais secos e pré-tratados com imersão em etanol e congelamento. Isto se deve ao fato que as amostras do tratamento SC não sofreram influência de adição de pré-tratamentos, ou seja, não obtiveram alterações na estrutura da matriz do produto como aquelas que tiveram a imersão em etanol e/ou do congelamento. Logo, evidenciando que a água presente no morango fresco é majoritariamente livre, o que facilita sua remoção com a secagem, especialmente que este tratamento foi o que exigiu o maior tempo para

completar o processo (Macedo et al., 2021b). No entanto, foi o mais eficaz na redução da atividade de água.

Encolhimento

A remoção significativa de água durante o processo de secagem é uma das principais causas de encolhimento nos alimentos, sendo essa água o componente predominante em muitos alimentos (Macedo et al., 2022b). Este fenômeno geralmente resulta em uma redução de volume anisotrópica, que pode levar a um aspecto visual indesejável no produto final (Macedo et al., 2022b).

Assim, os morangos secos apresentaram uma redução de volume variando entre 74,13% e 79,13% (Figura 4b). Durante o processo de secagem, a remoção da água faz com que a matriz viscoelástica se desloque para o espaço previamente ocupado pela água, resultando no encolhimento do material (Dehghannya et al., 2018). Portanto, altos valores de encolhimento se justificam pela redução expressiva do teor de umidade das amostras, em que o morango fresco apresentou $93,58 \pm 0,74\%$, enquanto as amostras secas apresentaram teor de umidade médio de $21,15 \pm 2,76\%$. Gamboa-Santos et al. (2014) identificaram uma forte correlação entre a taxa de umidade e o grau de retração durante a secagem de morangos.

A Figura 4b mostra que não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos, ou seja, neste estudo a aplicação ou não de pré-tratamentos antes da secagem não interferiu no encolhimento do material em relação ao produto fresco desidratado.

Com relação ao uso do etanol, resultados semelhantes foram observados no estudo de Macedo et al. (2023). No entanto, em outros trabalhos o etanol aumentou o encolhimento do material (Silva et al., 2018; Macedo et al., 2021b). De acordo com Silva et al. (2018), a evaporação acelerada da água durante a secagem com etanol pode provocar danos mais severos à estrutura do material, resultando em um maior encolhimento.

No estudo de Macedo et al. (2021b) foi observado que o uso do etanol como pré-tratamento aumentou significativamente o encolhimento do morango, tanto em amostras tratadas osmoticamente quanto em não tratadas. Uma possível justificativa para essa diferença entre os resultados está no formato das amostras: enquanto neste estudo foram utilizadas fatias de 5 mm, os autores utilizaram cubos de morangos de

10 mm. Portanto, a geometria do material pode influenciar a contração sob os mesmos parâmetros de pré-tratamento e secagem convectiva.

Em contraste, um estudo realizado com uvas mostrou um encolhimento significativo do material quando o congelamento foi utilizado como pré-tratamento (Noshad; Ghasemi, 2020).

Dureza

A dureza é fisicamente definida como a força necessária para deformar um material. Sensorialmente, a dureza refere-se à força requerida para comprimir um alimento sólido entre os dentes molares. Este parâmetro é essencial para caracterizar a textura de alimentos secos (Macedo et al., 2021a).

A dureza dos morangos secos é apresentada na Figura 4c. Estudos anteriores reportaram valores semelhantes (Deng; Zhao, 2008; Schwieterman et al., 2014; Li et al., 2019; Khubber et al., 2020; Tylewicz et al., 2020). As amostras secas submetidas aos tratamentos SC e PE+SC demonstraram maior dureza em comparação com os morangos frescos, conforme também observado por Macedo et al. (2021b). Esse aumento de dureza é atribuído a alterações físicas, como o encolhimento, que ocorre devido à redução do teor de umidade durante a secagem, resultando em uma textura mais firme. Embora o aumento da dureza melhore a resistência física do morango (Macedo et al., 2022b), um aumento excessivo pode levar à rejeição do produto pelos consumidores (Lyu et al., 2017).

O uso de etanol não teve influência significativa na dureza dos morangos secos, em comparação com as respectivas amostras não pré-tratadas (Figura 4c). No entanto, o congelamento dos morangos resultou em amostras de baixa dureza, com valores inferiores aos das amostras secas não congeladas (SC e PE+SC), e iguais ao morango fresco. Isso pode ser atribuído às mudanças na estrutura celular do morango, decorrentes da formação de cristais de gelo durante o congelamento. Esses cristais podem ter causado danos irreversíveis, levando à perda da estrutura do material e dificultando o processo de enrijecimento durante a secagem.

Higroscopicidade

A higroscopicidade é uma propriedade importante em alimentos desidratados, pois se refere à capacidade do produto de absorver umidade do ar (Macedo et al., 2021b). Produtos com alta higroscopicidade podem perder estabilidade rapidamente,

devido ao aumento da absorção de água do ambiente, o que eleva a atividade de água e diminui a vida útil do produto (Sette et al., 2016).

Logo, neste estudo, é desejável que o morango desidratado apresente baixa higroscopicidade, uma vez que produtos secos de maior qualidade são caracterizados pela menor tendência a absorver umidade (Zhang et al., 2024).

Os resultados (Figura 4d) mostraram que a amostra não foi afetada pelos tratamentos estudados, pois não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos. Isso indica que, a aplicação ou não de pré-tratamentos antes da secagem não interfere na absorção de umidade pelo material. Com relação à imersão em etanol antes da secagem de morango, resultado semelhante foi observado no estudo de Macedo et al. (2021b). Por outro lado, a literatura não apresenta estudos que avaliem a higroscopicidade de morangos secos considerando o efeito do pré-tratamento por congelamento. Assim, este estudo contribui de forma inédita ao investigar a secagem de morangos pré-tratados com congelamento.

Cor

As características colorimétricas das amostras de morango, tanto frescas quanto submetidas aos diferentes tratamentos de secagem, foram avaliadas e os resultados estão apresentados na Figura 5.

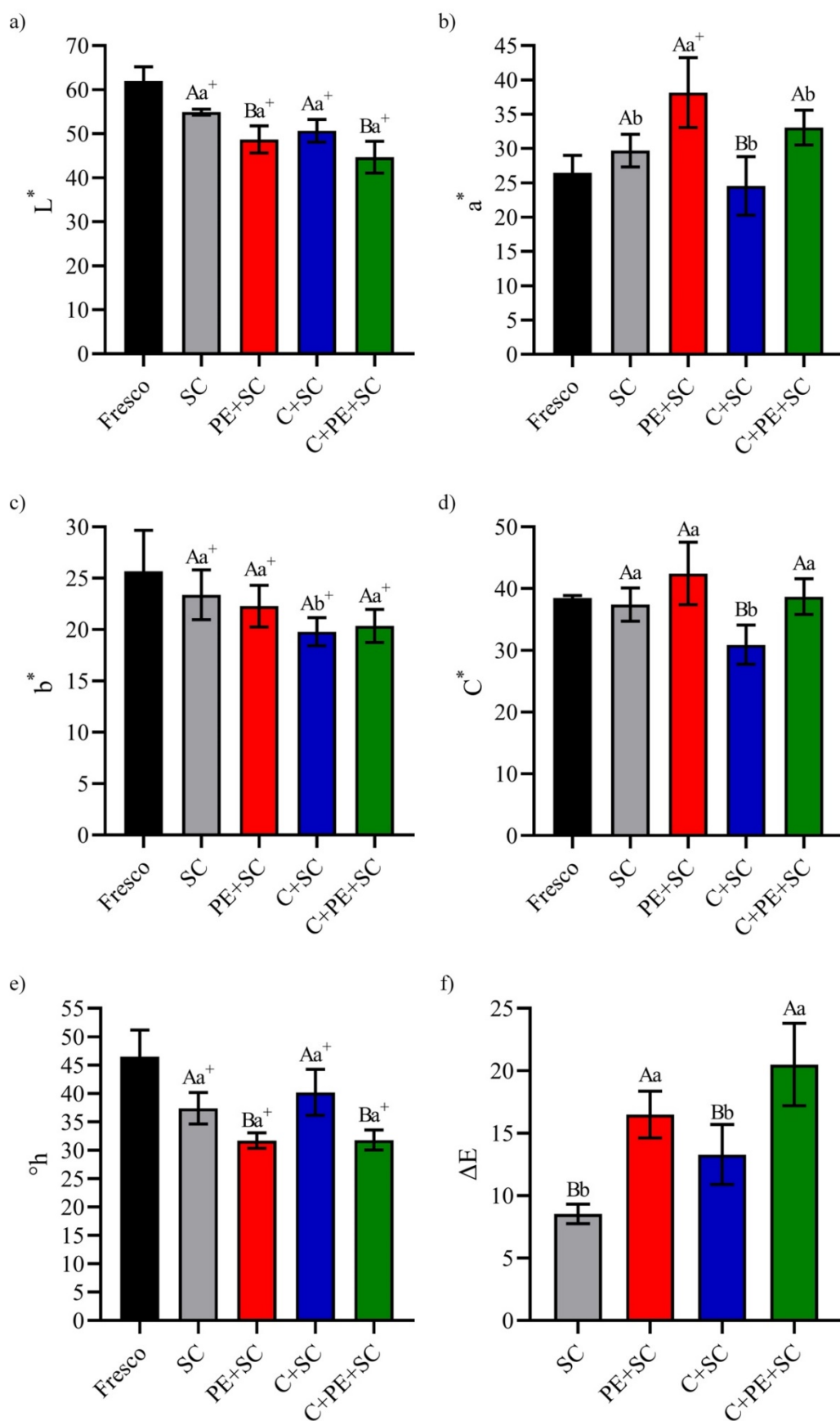


Figura 5: Parâmetros colorimétricos das amostras.

Os valores são expressos em média $\pm$ desvio-padrão, $n = 3$. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre as condições de congelamento (sim/não) e letras maiúsculas indicam diferenças entre o pré-tratamento com etanol (sim/não), de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). O sinal positivo (+) indica diferença significativa entre cada tratamento e a amostra fresca, pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

A avaliação dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , h° e ΔE) revelou alterações significativas na coloração dos morangos em função dos tratamentos de pré-processamento e secagem aplicados. Os valores de L^* (Figura 5a), que indicam a luminosidade, apresentaram redução em todos os tratamentos em relação à amostra fresca, evidenciando escurecimento do produto após a secagem. O tratamento com secagem convectiva sem pré-tratamento (SC) e C+SC apresentaram a menor perda de luminosidade, mantendo valores próximos ao controle fresco, o que está de acordo com relatos prévios que apontam a secagem por convecção como um método moderado quanto à degradação de atributos visuais (Doymaz et al., 2025).

Apenas o tratamento PE+SC apresentou maior valor para o parâmetro a^* quando comparado à amostra fresca (Figura 5b), indicando uma maior tendência da cor vermelha. No entanto, esse tratamento não diferiu da amostra sem pré-tratamento. O emprego do etanol apresentou efeito benéfico para manutenção da cor vermelha em amostras pré-congeladas, possivelmente devido à inativação parcial de enzimas oxidativas pelo etanol e à proteção parcial dos pigmentos antocianicos, como também observado em tratamentos com agentes antioxidantes durante a secagem de frutas (Zengin et al., 2025).

Quanto ao parâmetro b^* (Figura 5c), que representa a componente amarela da cor, observou-se redução em todos os tratamentos em comparação à amostra fresca. Essa tendência pode estar associada à degradação térmica de flavonoides amarelos sensíveis, fenômeno já descrito na literatura para frutas pigmentadas. É importante notar que a secagem também promove a remoção de água, podendo concentrar determinados compostos e influenciar sua expressão visual, o que pode explicar variações sutis entre os tratamentos.

O croma (C^*) (Figura 5d), indicador da saturação da cor, (Figura 5d) não diferiu para nenhum dos tratamentos, em relação à amostra fresca. O emprego do congelamento antes da secagem convectiva resultou em diminuição do C^* , para

amostras sem pré-tratamento com etanol. No entanto, o uso do etanol para amostras congeladas teve um efeito de aumento desse parâmetro.

O parâmetro de matiz (h°) (Figura 5e) apresentou deslocamento para ângulos menores em todos os tratamentos, indicando mudança do tom vermelho para nuances mais alaranjadas, o que pode refletir tanto a degradação seletiva de antocianinas quanto a mudança na razão entre antocianinas e carotenoides durante o processamento térmico (Hong et al., 2025). O etanol teve efeito de diminuição do h° , enquanto o congelamento não apresentou nenhum efeito.

A diferença total de cor (ΔE) (Figura 5f), calculada em relação à amostra fresca, confirmou as alterações visuais observadas. O etanol aumentou o valor ΔE , enquanto o congelamento não apresentou nenhum efeito sobre esse parâmetro. Estudos anteriores com morangos relataram comportamento semelhante, onde tratamentos combinados com congelamento ou métodos térmicos mais intensos resultaram em maiores variações de cor (Cengiz et al., 2025).

pH e acidez

As amostras frescas e secas foram caracterizadas quanto ao pH e acidez (Figura 6).

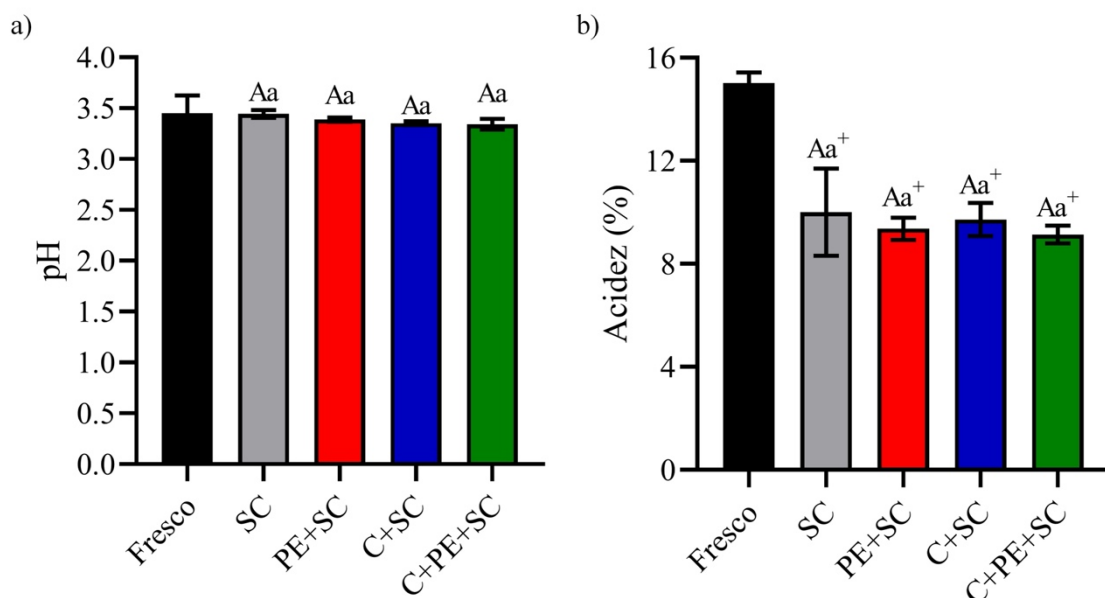


Figura 6: pH e acidez das amostras.

Os valores são expressos em média $\pm$ desvio-padrão, $n = 3$. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre as condições de congelamento (sim/não) e letras maiúsculas indicam diferenças entre o pré-tratamento com etanol

(sim/não), de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). O sinal positivo (+) indica diferença significativa entre cada tratamento e a amostra fresca, pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

A avaliação dos parâmetros ácido-base dos morangos revelou que os diferentes tratamentos de secagem não promoveram alterações estatisticamente significativas nos valores de pH (Figura 6a) quando comparados à amostra fresca ($p > 0,05$). Todos os tratamentos mantiveram o pH na faixa de 3,4 a 3,6, valor típico de morangos maduros. A estabilidade do pH sugere que a matriz alimentar preservou parcialmente seu sistema tampão natural, possivelmente em razão da relativa resistência térmica de ácidos orgânicos não voláteis, como o ácido cítrico e o ácido málico. Estudos anteriores em morangos demonstram que esses ácidos apresentam maior estabilidade ao calor do que outros compostos bioativos, auxiliando na regulação do pH mesmo após tratamentos térmicos moderados (Hong et al., 2025).

Em contraste, a acidez titulável (Figura 6b) apresentou redução significativa ($p < 0,05$) em todas as amostras secas. Enquanto a amostra fresca apresentou valor médio de ~15,5%, os tratamentos oscilaram entre 11% e 12%, indicando uma diminuição na quantidade total de ácidos orgânicos disponíveis. Essa redução pode decorrer da degradação parcial de compostos ácidos, incluindo perdas térmicas, volatilização de frações mais lábeis ou transformações enzimáticas e oxidativas, que podem ter sido intensificadas por pré-tratamentos como o congelamento ou a exposição ao etanol.

Assim, mesmo mantendo-se o pH relativamente constante, a queda da acidez titulável indica perda quantitativa de ácidos, o que pode impactar no sabor. Estudos prévios reforçam que o impacto da secagem na acidez depende tanto da técnica utilizada quanto da composição inicial da matriz, como observado em frutas secas e purês de frutas tropicais (Fernandes et al., 2024; Ankeli et al., 2025).

De forma geral, a manutenção do pH, acompanhada da redução na acidez titulável, sugere um efeito benéfico do processo de secagem na suavização da acidez sensorial. Essa característica é particularmente desejável para formulações alimentícias que visam perfis sensoriais menos ácidos, como *snacks* de frutas, pós liofilizados ou recheios desidratados para confeitaria. Produtos à base de frutas desidratadas têm demonstrado bom desempenho sensorial e estabilidade físico-

química em embalagens modificadas, sendo indicados como alternativas saudáveis e tecnicamente viáveis para consumo direto ou em panificação (Roppolo et al., 2025).

Vitamina C, antocianinas totais, fenólicos totais e capacidade antioxidantes

As amostras frescas e desidratadas foram caracterizadas quanto ao teor de vitamina C (AA), antocianinas totais (TAT), fenólicos totais (TFT) e capacidade antioxidantes (CA_{FRAP} e CA_{ABTS}), e os resultados são apresentados na Figura 7.

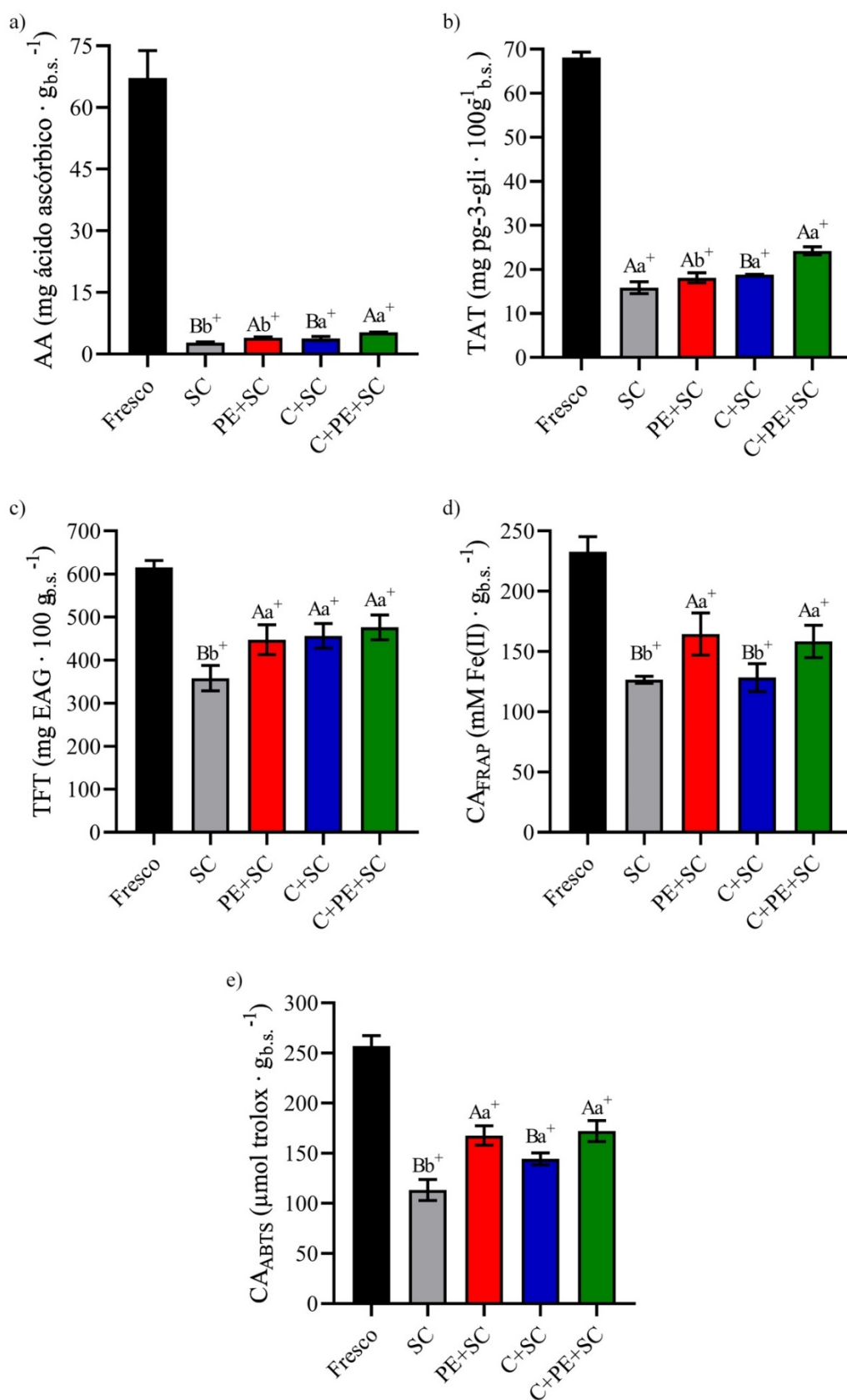


Figura 7: Vitamina C (AA), antocianinas totais (TAT), fenólicos totais (TFT) e capacidade antioxidantes (CA_{FRAP} e CA_{ABTS}).

Os valores são expressos em média $\pm$ desvio-padrão, $n = 3$. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre as condições de congelamento (sim/não) e letras maiúsculas indicam diferenças entre o pré-tratamento com etanol (sim/não), de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). O sinal positivo (+) indica diferença significativa entre cada tratamento e a amostra fresca, pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

A análise dos compostos bioativos e da atividade antioxidante dos morangos, conforme apresentado na Figura 7, evidenciou reduções significativas nos teores de vitamina C (AA), antocianinas totais (TAT), compostos fenólicos totais (TFT), e nas atividades antioxidantes determinadas pelos métodos FRAP e ABTS, em função dos diferentes tratamentos de secagem e pré-tratamento.

Como esperado, a amostra fresca apresentou os maiores valores em todos os parâmetros avaliados, refletindo a riqueza natural do morango em compostos antioxidantes e bioativos. A secagem, independentemente do tratamento aplicado, promoveu reduções marcantes nesses compostos, resultado atribuível à sua conhecida termossensibilidade e suscetibilidade à oxidação, especialmente para as antocianinas e a vitamina C (Seke et al., 2023).

Entre os tratamentos testados, o uso do etanol como pré-tratamento (PE+SC) e sua combinação com congelamento (C+PE+SC) apresentaram os melhores resultados em termos de preservação de AA, TAT e TFT, bem como nas atividades antioxidantes. Tais efeitos podem estar associados à ação do etanol como inibidor de enzimas oxidativas (como a polifenoloxidase), além de sua possível capacidade de reduzir a exposição dos compostos à oxidação durante a secagem devido à redução do tempo deste processo (Khatun et al., 2024; Zhan et al., 2024).

O tratamento com secagem convectiva isolada (SC) resultou nos menores valores médios para AA, TFT e CA_{ABTS} , indicando sua limitação para a conservação funcional dos morangos. Resultados semelhantes foram observados por Hussain et al. (2024), que relataram perdas significativas de compostos bioativos em morangos submetidos à secagem térmica direta sem estratégias de proteção.

Os perfis de atividade antioxidante avaliados pelos métodos FRAP e ABTS acompanharam de forma coerente o comportamento dos compostos bioativos. Os tratamentos que melhor preservaram o conteúdo de antocianinas e fenólicos apresentaram também as maiores capacidades antioxidantes, reforçando a

correlação positiva entre o conteúdo fenólico e a atividade antioxidante em morangos (Maria et al., 2024; Saeedi et al., 2024).

Portanto, os tratamentos com etanol apresentam-se como estratégias promissoras para a conservação de compostos bioativos e propriedades funcionais dos morangos. Esses compostos, como vitamina C, antocianinas e fenólicos totais, estão associados a efeitos benéficos à saúde humana, incluindo propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, cardioprotetoras e potenciais efeitos anticarcinogênicos. A vitamina C, por exemplo, desempenha papel importante na neutralização de espécies reativas de oxigênio, na regeneração de outros antioxidantes e na prevenção de doenças crônicas (Rosa et al., 2024).

Além disso, os compostos fenólicos e as antocianinas presentes nos morangos exercem ações importantes na modulação da microbiota intestinal e na proteção contra distúrbios metabólicos, cardiovasculares e neurodegenerativos (Saini et al., 2024; Xin et al., 2024). Esses efeitos tornam tais compostos valorizados em alimentos funcionais, justificando o interesse em estratégias tecnológicas que favoreçam sua retenção durante o processamento.

Especificamente no caso dos morangos, práticas de cultivo e manejo pós-colheita, assim como os métodos de secagem e pré-tratamento, impactam diretamente a conservação desses nutrientes. Estudos recentes demonstram que o cultivo orgânico e abordagens que preservam a integridade da matriz vegetal estão associados a maior retenção de compostos bioativos e maior atividade antioxidante (Martínez-Ferri et al., 2024; Sharma et al., 2024). Dessa forma, a preservação desses componentes não apenas assegura o valor nutricional do produto final, mas também reforça seu potencial funcional e apelo comercial. A secagem convectiva isolada, embora tecnicamente viável, representa a alternativa menos eficaz nesse contexto.

Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais é apresentada na Figura 8.

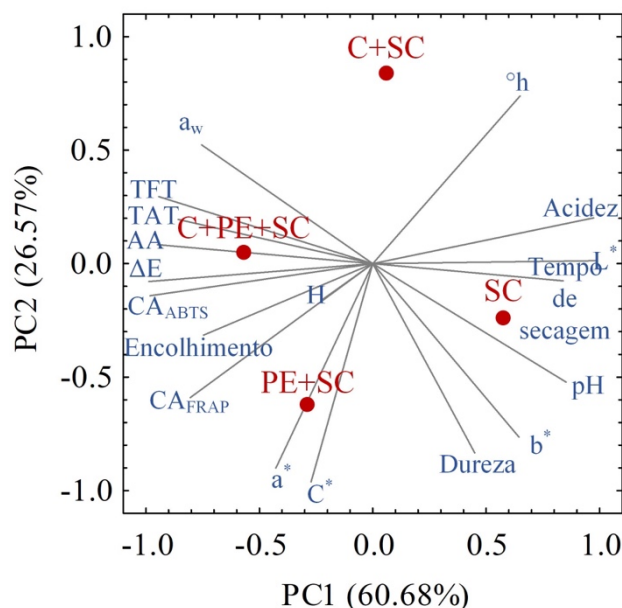


Figura 8: Análise de componentes principais (PCA).

Análise de componentes principais das respostas de morangos secos em pré-tratamento de congelamento e etanol.

Legenda: SC: amostra fresca (controle) seguida de secagem convectiva; PE+SC: pré-tratamento com etanol seguido de secagem convectiva; C+SC: pré-tratamento com congelamento seguido de secagem convectiva; C+PE+SC: pré-tratamentos combinados de congelamento e etanol seguidos de secagem convectiva.

A análise de componentes principais (PCA) apresentada na Figura 8 permitiu visualizar a correlação entre os diferentes tratamentos de pré-processamento e secagem de morangos e as variáveis físico-químicas avaliadas. Os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram, conjuntamente, 87,25% da variância total dos dados (60,68% por PC1 e 26,57% por PC2), o que indica boa capacidade de discriminação do modelo.

A PCA permitiu identificar a distribuição dos tratamentos em função das variáveis analisadas, evidenciando agrupamentos distintos. A organização dos tratamentos no *biplot* indica a existência de correlações importantes entre características nutricionais, funcionais e visuais, como também demonstrado em análises multivariadas aplicadas a frutas secas (Jaśkiewicz et al., 2025).

O tratamento C+SC (congelamento seguido de secagem convectiva) foi posicionado no quadrante superior central-direito, próximo ao vetor °h (matiz), e mais distante das variáveis associadas à bioatividade, como TAT, TFT, AA, CA_{ABTS} e CA_{FRAP}. Essa disposição gráfica sugere que o congelamento isolado, sem agentes protetores, pode ter favorecido a ruptura celular e consequente exposição de

compostos bioativos à degradação oxidativa durante a secagem, como observado em estudos com frutas sensíveis (Shah et al., 2025).

Já o tratamento C+PE+SC posicionou-se próximo aos vetores TAT, TFT, AA e ΔE , revelando desempenho intermediário. Embora tenha promovido melhor retenção de compostos bioativos em relação ao congelamento isolado, sua associação ao vetor ΔE indica que a alteração visual foi mais acentuada, possivelmente refletindo degradação parcial de pigmentos ou reorganização estrutural que afetou a percepção de cor (Uribe et al., 2024; Cengiz et al., 2025).

O tratamento PE+SC destacou-se no quadrante inferior esquerdo, alinhado aos vetores de maior saturação de cor (C^*), tonalidade vermelha (a^*) e capacidade antioxidante (CA_{FRAP}), o que reforça a eficácia do etanol como pré-tratamento na proteção contra a oxidação de compostos fenólicos e antociânicos. A inativação enzimática provocada pelo etanol, combinada à sua ação como barreira à difusão de oxigênio, tem sido associada à preservação funcional em morangos e outras frutas (Dong et al., 2025).

O tratamento SC, por sua vez, posicionou-se à direita do gráfico, próximo aos vetores pH, acidez, tempo de secagem e encolhimento, indicando que, apesar de não preservar eficientemente os compostos bioativos, a secagem convectiva simples resultou em menor deformação estrutural, preservando características físicas importantes da matriz vegetal.

A distribuição dos vetores colorimétricos entre diferentes quadrantes demonstra que a “cor” não pode ser atribuída a um único eixo ou tratamento. Parâmetros como L^* , a^* , b^* , C^* e h° respondem de maneira distinta a estímulos térmicos e oxidativos, e sua análise multivariada permite uma avaliação mais precisa da qualidade visual dos frutos (Khatun et al., 2024).

Notavelmente, os vetores relacionados aos compostos bioativos e à atividade antioxidante (TAT, TFT, AA, CA_{FRAP} , CA_{ABTS}) agruparam-se à esquerda do gráfico, confirmando a superioridade dos tratamentos com etanol na preservação funcional. Por outro lado, encolhimento e atividade de água (a_w) alinharam-se a tratamentos com menor desempenho funcional, sugerindo que alterações físicas como encolhimento e maior atividade de água podem estar negativamente correlacionadas com a estabilidade de compostos sensíveis.

A aplicação da PCA demonstrou-se eficiente como ferramenta exploratória para integrar múltiplos parâmetros de qualidade. Sua utilização neste estudo permitiu

diferenciar os tratamentos com base em atributos-chave e reforçou o papel do etanol como estratégia promissora para conservação da funcionalidade em produtos desidratados de morango.

CONCLUSÃO

Este estudo cumpriu o objetivo de avaliar a influência do congelamento e da imersão em etanol na secagem convectiva do morango e em seus parâmetros de qualidade. Os resultados mostraram que o etanol reduziu em até 20% o tempo de secagem e aumentou a taxa de remoção de água, confirmando sua eficiência como pré-tratamento. O congelamento isolado promoveu menor dureza nas amostras, evidenciando impacto na textura. Ambos os tratamentos reduziram a atividade de água para níveis entre 0,37 e 0,43, adequados para conservação.

O modelo de Page ajustou-se de forma satisfatória aos dados ($R^2 \geq 0,994$), comprovando sua aplicabilidade para descrever a cinética de secagem dos morangos e indicando maior difusividade da água em amostras tratadas com etanol. A comparação entre os tratamentos revelou que a combinação de congelamento e etanol não apresentou efeito sinérgico. Já a análise das amostras frescas e desidratadas demonstrou que os pré-tratamentos favoreceram a preservação de compostos bioativos, com destaque para a retenção de vitamina C e fenólicos no etanol e de antocianinas no congelamento.

Conclui-se que o etanol é uma estratégia promissora para otimizar a secagem convectiva do morango, promovendo eficiência no processo e manutenção de atributos funcionais. Além disso, o tratamento que combina congelamento e etanol, embora não tenha apresentado vantagens adicionais em parâmetros laboratoriais, pode ser o mais adequado para produtores rurais e para a indústria, pois alia técnicas de fácil aplicação, baixo custo, viabilidade operacional e resultados consistentes na conservação e na qualidade final do produto.

Como perspectivas futuras, sugere-se a realização de análises sensoriais para avaliar a aceitação do produto desidratado, estudos de vida de prateleira e estabilidade oxidativa durante o armazenamento, além da investigação de outros pré-tratamentos físicos e combinados. Também é recomendável explorar modelagens avançadas e análises multivariadas mais robustas, a fim de aprofundar a compreensão entre variáveis de processo e qualidade final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAK, Nafiye; HEYBELI, Nursel; ERTEKIN, Can. Infrared drying of strawberry. **Food Chemistry**, v. 219, p. 109–116, 15 mar. 2017.
- ADDU, Philip W. *et al.* Impact of pre-freezing and microwaves on drying behavior and terpenes in hops (*Humulus lupulus*). **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 31, p. 100436, dez. 2022.
- ALI, Liela Mohamed *et al.* Novel postharvest management using laser irradiation to maintain the quality of strawberry. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 14, n. 6, p. 3615–3624, 1 dez. 2020.
- ALP, Duygu; BULANTEKIN, Özcan. The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: a review. **European Food Research and Technology**, v. 247, n. 6, p. 1333–1343, 2021.
- ANDO, Yasumasa *et al.* Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment. **LWT**, v. 100, p. 294–299, 1 fev. 2019.
- AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC International**. 20. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2016.
- ARAÚJO, Cintia da Silva *et al.* Influence of pretreatment with ethanol and drying temperature on physicochemical and antioxidant properties of white and red pulp pitayas dried in foam mat. **Drying Technology**, v. 40, n. 3, p. 484–493, 2020.
- AUBERT, Christophe *et al.* Impact of maturity stage at harvest on the main physicochemical characteristics, the levels of vitamin C, polyphenols and volatiles and the sensory quality of Gariguette strawberry. **European Food Research and Technology**, v. 247, n. 1, p. 37–49, 1 jan. 2021.

- BALICU, Adina Alexandra; POPA, Mona Elena. Trends in prolonging the post-harvest life of strawberries – a review. **Annals of the University Dunarea de Jos of Galati, Fascicle VI: Food Technology**, v. 42, n. 1, p. 9–16, 2018.
- BASU, Arpita *et al.* Strawberry As a Functional Food: An Evidence-Based Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 54, n. 6, p. 790–806, 2014.
- BHAT, Rajeev; STAMMINGER, Rainer. Preserving Strawberry Quality by Employing Novel Food Preservation and Processing Techniques - Recent Updates and Future Scope - An Overview. **Journal of Food Process Engineering**, v. 38, n. 6, p. 536–554, 1 dez. 2015.
- BRAGA, A. M. P. *et al.* Volatiles identification in pineapple submitted to drying in an ethanolic atmosphere. **Drying Technology**, v. 27, n. 2, p. 248–257, 2009.
- BRAGA, Alice M. P. *et al.* Volatile composition changes of pineapple during drying in modified and controlled atmosphere. **International Journal of Food Engineering**, v. 6, n. 1, 2010.
- CALÍN-SÁNCHEZ, Ángel *et al.* **Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs.** **Foods**MDPI AG, , 1 set. 2020.
- CARVALHO, Gisandro Reis *et al.* **Iron-Fortified Pineapple Chips Produced Using Microencapsulation, Ethanol, Ultrasound and Convective Drying.** **Food Engineering Reviews**Springer, , 1 set. 2021.
- CENGİZ, Nurten; ABDULVAHITOĞLU, Aslı; ABDULVAHITOĞLU, Adnan. Comparative Analysis of Different Drying Methods on Strawberry Aroma Compounds via Multi-Criteria Decision-Making Techniques. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 15, n. 2, 2025.
- CHITRAKAR, Bimal; ZHANG, Min; ADHIKARI, Benu. **Dehydrated foods: Are they microbiologically safe?** [S.l.]: Taylor & Francis, 2019. v. 59

- CICHELLA FRABETTI, Ana Caroline *et al.* Strawberry-hydrocolloids dried by continuous cast-tape drying to produce leather and powder. **Food Hydrocolloids**, v. 121, 1 dez. 2021.
- CORRÊA, Jefferson Luiz Gomes *et al.* The Influence of Ethanol on the Convective Drying of Unripe, Ripe, and Overripe Bananas. **Drying Technology**, v. 30, n. 8, p. 817–826, jun. 2012.
- DALVI-ISFAHAN, Mohsen *et al.* **Review on identification, underlying mechanisms and evaluation of freezing damage. Journal of Food Engineering** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2019.
- DEHGHANNYA, Jalal; BOZORGHI, Somayyeh; HESHMATI, Maryam Khakbaz. Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 54, n. 4, p. 929–954, 2018.
- DENG, Yun; ZHAO, Yanyun. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). **Lwt**, v. 41, n. 9, p. 1575–1585, 2008.
- DERMESONLOUOGLOU, Efimia K.; GIANNAKOUREOU, Maria; TAOUKIS, Petros S. Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment with alternative osmotic solutes to the shelf life of frozen strawberry. **Food and Bioproducts Processing**, v. 99, n. 2004, p. 212–221, 2016.
- DONG, Yingying *et al.* Elevated Oxygen Contributes to the Promotion of Polyphenol Biosynthesis and Antioxidant Capacity: A Case Study on Strawberries. **Horticulturae**, v. 11, n. 1, 2025.
- DOYMAZ, İbrahim *et al.* Influence of Infrared Radiation of Drying Characteristics, Total Phenolic Content, Antioxidant Capacity and Color Properties of Pomegranate

Seeds. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, v. 69, n. 1, p. 113–122, 2025.

FAOSTAT. **FAOSTAT Statistics Division Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: [S.n.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 8 fev. 2025.

FENG, Yabin *et al.* Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 50, p. 363–372, 1 jan. 2019.

FERNANDES, J. M. *et al.* Foam-mat drying technology applied for the development of cashew juice powder: effect on physicochemical properties and principal component analysis. v. 20, p. 1–14, 2024.

GAMBOA-SANTOS, Juliana *et al.* Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry. **Journal of Food Engineering**, v. 128, p. 132–139, 1 maio 2014a.

GAMBOA-SANTOS, Juliana *et al.* Impact of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation in dried strawberries. **Food Chemistry**, v. 153, p. 164–170, 15 jun. 2014b.

GOMES, Bruna de Oliveira *et al.* Uvaia fruit (*Eugenia pyriformis* Cambess) drying: Ethanol as pre-treatment, convective drying kinetics and bioactive compounds. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 2, 1 fev. 2022.

GRANELLA, Suian José; BECHLIN, Taise Raquel; CHRIST, Divair. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 76, 1 mar. 2022.

GUAZI, Julaisa Scarpin; LAGO-VANZELA, Ellen Silva; CONTI-SILVA, Ana Carolina. Development of smoothies from dehydrated products of strawberry and banana

- pulps obtained through foam-mat drying. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 54–61, 1 jan. 2019.
- GUEDES, Jaqueline S. *et al.* Structural modification on potato tissue and starch using ethanol pre-treatment and drying process. **Food Structure**, v. 29, 1 jul. 2021.
- HAJJI, Sawssen *et al.* Optimization of the formulation of chitosan edible coatings supplemented with carotenoproteins and their use for extending strawberries postharvest life. **Food Hydrocolloids**, v. 83, p. 375–392, 1 out. 2018.
- HONG, Hung Trieu *et al.* Phytochemicals, Organic Acid, and Vitamins in Red Rhapsody Strawberry—Content and Storage Stability. **Foods**, v. 14, n. 3, 2025.
- HUSSAIN, Ashiq *et al.* Effects of spray drying and ultrasonic assisted extraction on the phytochemicals, antioxidant and antimicrobial activities of strawberry fruit. **Food Chemistry Advances**, v. 5, n. January, p. 100755, 2024.
- J. A. ANKELI; IGBUM, O. G.; OKIBE, F. G. Comparative Effects of Drying Methods on Physicochemical Properties of Puree Blends of Some Indigenous Varieties of Watermelon (*Citrullus lanatus*), Orange (*Citrus sinensis*) and Mango (*Mangifera indica*) Fruits. v. 2, n. 1, p. 15–29, 2025.
- JASŃKIEWICZ, Katarzyna; SZCZEŚNA, Teresa; JACHUŁA, Jacek. How Phenolic Compounds Profile and Antioxidant Activity Depend on Botanical Origin of Honey—A Case of Polish Varietal Honeys. **Molecules**, v. 30, n. 2, 2025.
- JIANG, Jiahui *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries. **LWT**, v. 145, p. 111300, 1 jun. 2021.
- JUNQUEIRA, João Renato de Jesus; CORRÉA, Jefferson L. G.; MENDONÇA, Kamilla Soares de. Evaluation of the Shrinkage Effect on the Modeling Kinetics of Osmotic Dehydration of Sweet Potato (*Ipomoea batatas* (L.)). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 3, p. 1–10, 2017.

- KAMILOGLU, Senem. Effect of different freezing methods on the bioaccessibility of strawberry polyphenols. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 8, p. 2652–2660, 1 ago. 2019.
- KHATUN, Most Shamima; ISLAM, Nazrul; CHOUDHURY, Shormin. Effect of pretreatment and different drying methods on the antioxidant activities and physico-chemical properties of bitter gourd powder. **Journal of Applied Horticulture**, v. 26, n. 4, p. 429–434, 2024.
- KHUBBER, Sucheta *et al.* Non-conventional osmotic solutes (honey and glycerol) improve mass transfer and extend shelf life of hot-air dried red carrots: Kinetics, quality, bioactivity, microstructure, and storage stability. **Lwt**, v. 131, n. May, p. 109764, 2020.
- KUMAR, Sanjeev *et al.* Secondary product from strawberry (*Fragaria ananassa*) fruit for extended preservation and value addition. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 4, p. 1598–1609, 2022.
- LAURIA, Giulia *et al.* Supplemental red LED light promotes plant productivity, “photomodulate” fruit quality and increases *Botrytis cinerea* tolerance in strawberry. **Postharvest Biology and Technology**, v. 198, 1 abr. 2023.
- LEE, Danbee *et al.* Effectiveness of cellulose and chitosan nanomaterial coatings with essential oil on postharvest strawberry quality. **Carbohydrate Polymers**, v. 298, 15 dez. 2022.
- LEI, Ting ting; QIAN, Jing; YIN, Cheng. Equilibrium modified atmosphere packaging on postharvest quality and antioxidant activity of strawberry. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 11, p. 7125–7134, 1 nov. 2022.
- LI, Dongmei; ZHU, Zhiwei; SUN, Da Wen. **Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review**. **Trends in Food Science and Technology** Elsevier Ltd, , 1 maio 2018.

- LI, Li *et al.* Effects of Polysaccharide-Based Edible Coatings on Quality and Antioxidant Enzyme System of Strawberry during Cold Storage. **International Journal of Polymer Science**, v. 2017, 2017.
- LI, Xiao *et al.* Texture improvement and deformation inhibition of hot air-dried apple cubes via osmotic pretreatment coupled with instant control pressure drop (DIC). **Lwt**, v. 101, n. August 2018, p. 351–359, 2019.
- LLAVATA, Beatriz *et al.* **Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. Current Opinion in Food Science** Elsevier Ltd, , 1 out. 2020.
- LYU, Jian *et al.* Effect of sucrose concentration of osmotic dehydration pretreatment on drying characteristics and texture of peach chips dried by infrared drying coupled with explosion puffing drying. **Drying Technology**, v. 35, n. 15, p. 1887–1896, 2017.
- MACEDO, Leandro Levate *et al.* Influence of yacon syrup concentration and drying air temperature on properties of osmotically pre-dehydrated dried banana. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 57, n. 3, p. 441–451, 2021a.
- MACEDO, Leandro Levate *et al.* Convective Drying with Ethanol Pre-treatment of Strawberry Enriched with Isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, v. 14, n. 11, p. 2046–2061, 1 nov. 2021b.
- MACEDO, Leandro Levate *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. **LWT**, v. 155, 1 fev. 2022a.
- MACEDO, Leandro Levate *et al.* The impact of using vacuum and isomaltulose as an osmotic agent on mass exchange during osmotic dehydration and their effects on qualitative parameters of strawberries. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 8, 1 ago. 2022b.

- MACEDO, Leandro Levate *et al.* Use of Ethanol to Improve Convective Drying and Quality Preservation of Fresh and Sucrose and Coconut Sugar-impregnated Strawberries. **Food and Bioprocess Technology**, v. 16, n. 10, p. 2257–2271, 2023.
- MARIA, Asmaa A. *et al.* Journal of Food and Dairy Sciences Antioxidant-Rich Biodegradable Films : Incorporating Date Phenolic Extracts into Polyvinyl Alcohol Biofilms for Strawberry Preservation. v. 15, p. 203–217, 2024.
- MARTÍNEZ-FERRI, Elsa *et al.* Relation between Strawberry Fruit Redness and Bioactivity: Deciphering the Role of Anthocyanins as Health Promoting Compounds. **Foods**, v. 13, n. 1, 2024.
- MENON, Abhay; STOJCESKA, Valentina; TASSOU, Savvas A. **A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. Trends in Food Science and Technology**Elsevier Ltd, , 1 jun. 2020.
- MIANO, Alberto Claudio; ROJAS, Meliza Lindsay; AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte. Combining ultrasound, vacuum and/or ethanol as pretreatments to the convective drying of celery slices. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 79, p. 105779, 2021.
- MOHANA, Y. *et al.* **Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. Solar Energy**Elsevier Ltd, , 15 set. 2020.
- NEMZER, Boris *et al.* Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods. **Food Chemistry**, v. 262, p. 242–250, 1 out. 2018.
- NOSHAD, Mohammad; GHASEMI, Parisa. Influence of freezing pretreatments on kinetics of convective air-drying and quality of grapes. **Food Bioscience**, v. 38, n. September, p. 100763, 2020.

- PELLICER, José Antonio *et al.* Stability of microencapsulated strawberry flavour by spray drying, freeze drying and fluid bed. **Powder Technology**, v. 347, p. 179–185, 1 abr. 2019.
- QADERI, Rohullah *et al.* Stability of Strawberry Fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.) Nutritional Quality at Different Storage Conditions. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 13, n. 1, 1 jan. 2023.
- RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, Juan *et al.* Solar drying of strawberry using polycarbonate with UV protection and polyethylene covers: Influence on anthocyanin and total phenolic content. **Solar Energy**, v. 221, p. 120–130, 1 jun. 2021.
- ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 61, 1 maio 2020.
- ROJAS, Meliza Lindsay *et al.* Convective drying of cambuci, a native fruit from the Brazilian Atlantic Forest: Effect of pretreatments with ethanol and freezing. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 10, 1 out. 2021.
- ROJAS, Meliza Lindsay; AUGUSTO, Pedro E. D. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. **Journal of Food Engineering**, v. 233, p. 17–27, 1 set. 2018a.
- ROJAS, Meliza Lindsay; AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte. Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 49, p. 65–75, 1 out. 2018b.
- ROJAS, Meliza Lindsay; SILVEIRA, Isabela; AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte. Improving the infrared drying and rehydration of potato slices using simple approaches: Perforations and ethanol. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 5, 2019.

- ROJAS, Meliza Lindsay; SILVEIRA, Isabela; AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, v. 119, p. 20–30, 1 jan. 2020.
- ROPPOLO, Pasquale *et al.* Effect of Hot Air-Drying Technique on the Quality and Stability of Blood Orange Slices in Modified Atmosphere Packaging. **Horticulturae**, v. 11, n. 2, p. 1–18, 2025.
- ROSA, Alessio; PUJIA, Alberto Maria; ARCURI, Claudio. The Protective Role Antioxidant of Vitamin C in the Prevention of oral Disease: A Scoping Review of Current Literature. **European Journal of Dentistry**, 2024.
- SAEEDI, Mahin *et al.* Foliar application of sodium nitroprusside alters the physicochemical properties, antioxidant capacities, and enzymatic activities of strawberry cv. Camarosa. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 1–11, 2024.
- SAINI, Ramesh Kumar *et al.* Dietary Sources, Stabilization, Health Benefits, and Industrial Application of Anthocyanins—A Review. 2024.
- SANTOS, Karoline Costa *et al.* Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 70, 1 jan. 2021.
- SANTOS, Newton Carlos *et al.* Influence of ethanol and ultrasound on drying, bioactive compounds, and antioxidant activity of strawberries (*Fragaria × ananassa*). **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 99, n. 7, 2022a.
- SANTOS, Newton Carlos *et al.* Impact of pretreatments with ethanol and freezing on drying slice papaya: drying performance and kinetic of ultrasound-assisted extraction of phenolics compounds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 15 jan. 2022b.

- SANTOS, Newton Carlos *et al.* Influence of ethanol and ultrasound on drying, bioactive compounds, and antioxidant activity of strawberries (*Fragaria × ananassa*). **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 99, n. 7, 1 jul. 2022c.
- SANTOS, P. H. S.; SILVA, M. A. Kinetics of L-ascorbic acid degradation in pineapple drying under ethanolic atmosphere. **Drying Technology**, v. 27, n. 9, p. 947–954, set. 2009.
- SCHWIETERMAN, Michael L. *et al.* Strawberry flavor: Diverse chemical compositions, a seasonal influence, and effects on sensory perception. **PLoS ONE**, v. 9, n. 2, 2014.
- SEHRAWAT, Rachna; NEMA, Prabhat K.; KAUR, Barjinder Pal. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. **LWT**, v. 92, p. 548–555, 1 jun. 2018.
- SEKE, Faith *et al.* In Vitro Antioxidant Activity, Bioaccessibility, and Thermal Stability of Encapsulated Strawberry Fruit (*Fragaria × ananassa*) Polyphenols. **Foods**, v. 12, n. 21, 2023.
- SETTE, Paula; SALVATORI, Daniela; SCHEBOR, Carolina. Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 100, p. 156–171, 2016.
- SHAH, Hafiz Muhammad Shoaib *et al.* Copolyamide-Based Modified Atmosphere Packaging Attenuates Phenolic Degradation and Maintains Postharvest Quality of Rubus Berries. **Horticulturae**, v. 11, n. 1, 2025.
- SHARMA, Jyoti Bharti *et al.* Influence of Organic Nutrition Regime on Biochemical and Bioactive Compounds in Strawberry. v. I, p. 1–7, 2024.
- SILVA, M. G.; CELEGHINI, R. M. S.; SILVA, M. A. Effect of ethanol on the drying characteristics and on the coumarin yield of dried guaco leaves (*Mikania laevigata*

schultz BIP. Ex Baker). **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 3, p. 1095–1104, 1 jul. 2018.

TACO. **Tabela brasileira de composição de alimentos / NEPA – UNICAMP**. 4. ed. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2011.

TATEMOTO, Yuji *et al.* Drying characteristics of food materials injected with organic solvents in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure. **Journal of Food Engineering**, v. 158, p. 80–85, 2015.

TATEMOTO, Yuji *et al.* Effect of freezing pretreatment on the drying characteristics and volume change of carrots immersed in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure. **Journal of Food Engineering**, v. 173, p. 150–157, 1 mar. 2016.

TYLEWICZ, Urszula *et al.* Antioxidant and antimicrobial properties of organic fruits subjected to PEF-assisted osmotic dehydration. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 62, n. October 2019, p. 102341, 2020.

URIBE, Elsa *et al.* Drying: A Practical Technology for Blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.)—Processes and their Effects on Selected Health-Promoting Properties. **Antioxidants**, v. 13, n. 12, p. 1–18, 2024.

VALLESPER, Francisca *et al.* Freezing pre-treatments on the intensification of the drying process of vegetables with different structures. **Journal of Food Engineering**, v. 239, p. 83–91, 1 dez. 2018.

VIMERCATI, Wallaf Costa *et al.* Effect of temperature on drying kinetic in foam mat and anthocyanin degradation in strawberry. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, 2019.

WANG, Chao *et al.* Effects of ultrasound and ultra-high pressure pretreatments on volatile and taste compounds of vacuum-freeze dried strawberry slice. **LWT**, v. 160, 15 abr. 2022.

- WANG, Xule *et al.* Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion (*Allium fistulosum*). **Food Chemistry**, v. 295, p. 432–440, 15 out. 2019.
- XIN, Meili *et al.* Anthocyanins as natural bioactives with anti-hypertensive and atherosclerotic potential: Health benefits and recent advances. **Phytomedicine**, v. 132, n. July, p. 155889, 2024.
- XU, Baoguo *et al.* Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 78, 1 out. 2021.
- XU, Yanqun *et al.* Preharvest Ultraviolet C Treatment Affected Senescence of Stored Strawberry Fruit with a Potential Role of MicroRNAs in the Activation of the Antioxidant System. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 46, p. 12188–12197, 21 nov. 2018.
- XU, Yanqun *et al.* Preharvest UV-C treatment affected postharvest senescence and phytochemicals alternation of strawberry fruit with the possible involvement of abscisic acid regulation. **Food Chemistry**, v. 299, 30 nov. 2019.
- YANG, Na *et al.* Use of DENBA+ to assist refrigeration and extend the shelf-life of strawberry fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 195, p. 112152, jan. 2023.
- YANG, Ruixian *et al.* Biological Control of Root Rot of Strawberry by *Bacillus amyloliquefaciens* Strains CMS5 and CMR12. **Journal of Fungi**, v. 10, n. 6, p. 1–19, 2024.
- YANG, Ung *et al.* Effect of a Preharvest Peracetic Acid Treatment on the Natural Decay of Strawberries during Room-Temperature Storage. **Horticultural Science and Technology**, v. 40, n. 6, p. 689–702, 2022.

ZENGİN, Rukiye *et al.* Sun-Drying and Melatonin Treatment Effects on Apricot Color, Phytochemical, and Antioxidant Properties. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 15, n. 2, p. 1–18, 2025.

ZHAN, Danya *et al.* Green Synthesis of Antioxidant and Degradable Biomass-Based Preservative Films for Efficient Strawberry Preservation. **ACS Food Science and Technology**, 2024.

ZHANG, Xinyue *et al.* Effects of ultrasonic pretreatment on drying characteristics and water migration characteristics of freeze-dried strawberry. **Food Chemistry**, v. 450, n. March, p. 139287, 2024.