

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO POR MICRO-ONDAS NO SUCO DE ACEROLA: INATIVAÇÃO MICROBIANA E PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

EFFECTS OF MICROWAVE THERMAL TREATMENT ON ACEROLA JUICE: MICROBIAL INACTIVATION AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

DOI: 10.65747/conali2025v3c26

Carolina Silva Santos¹; Jéssica Gonçalves Matias²; Jordan Dias de Souza Silva³; Liandra de Souza Oliveira⁴; Deyzi Santos Gouveia⁵; Adriano Sant'ana Silva⁶

¹Estudante do Curso de pós-graduação em engenharia de alimentos - CTRN – UFCG;

²Estudante do Curso de pós-graduação em engenharia de alimentos - CTRN– UFCG;

³Estudante do Curso de pós-graduação em engenharia de alimentos - CTRN– UFCG; ⁴

Estudante do Curso de pós-graduação em engenharia de alimentos - CTRN– UFCG;

⁵Docente do Depto de Engenharia de Alimentos – CTRN– UFCG; ⁶Docente do Depto de Engenharia de Alimentos – CTRN– UFCG;

E-mail: carolinasilvaxx@gmail.com

RESUMO: A acerola (*Malpighia emarginata*) é uma fruta tropical rica em vitamina C e compostos bioativos, com grande potencial para a indústria alimentícia. No entanto, sua alta perecibilidade impõe desafios quanto à manutenção da qualidade microbiológica e físico-química dos produtos derivados. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do tratamento térmico por micro-ondas no suco de acerola, considerando diferentes combinações de tempo (60, 120 e 180 s) e potência (140, 280 e 420 W), frente a pasteurização convencional. O estudo foi conduzido no Laboratório de Engenharia de Alimentos -UFCG, onde foram realizadas as análises microbiológicas (mesófilos, bolores e leveduras) e físico-químicas (pH, acidez titulável, teor de água, vitamina C) e parâmetros de cor (L*, a*, b*, Chroma e Hue). As análises estatísticas incluíram ANOVA, teste de Tukey ($p < 0,05$), gráficos de Pareto, superfície de resposta e contorno. Os resultados mostraram que a potência e o tempo influenciaram nos parâmetros de qualidade do suco. O parâmetro tempo foi determinante para a redução da carga microbiana de bolores e leveduras, enquanto a potência teve maior impacto sobre a carga microbiana de mesófilos e os parâmetros de cor. O teor de vitamina C foi melhor preservado sob condições de potência moderada e tempo mais longo. Conclui-se que o uso de micro-ondas é uma alternativa viável à pasteurização convencional, permitindo a otimização do processamento com menor impacto nutricional e sensorial, sendo promissora para a conservação de sucos tropicais.

Palavras-chave: conservação de alimentos; segurança microbiológica; tecnologia emergente.

ABSTRACT: Acerola (*Malpighia emarginata*) is a tropical fruit rich in vitamin C and bioactive compounds, with great potential for the food industry. However, its high perishability poses challenges regarding the maintenance of the microbiological and physicochemical quality of derived products. This study aimed to evaluate the effects of microwave thermal treatment on acerola juice, considering different combinations of time (60, 120, and 180 s) and power (140, 280 and 420 W), compared to conventional pasteurization. The study was conducted at the Food Engineering Laboratory - UFCG, where microbiological (mesophilic bacteria, molds, and yeasts) and physicochemical analyses (pH, titratable acidity, moisture content, vitamin C) were performed, along

with color parameters (L^* , a^* , b^* , Chroma, and Hue). Statistical analyses included ANOVA, Tukey's test ($p < 0.05$), Pareto charts, and response surface and contour plots. The results showed that both power and time influenced the quality parameters of the juice. Time was a determining factor for the reduction of mold and yeast counts, while power had a greater impact on mesophilic bacteria and color parameters. Vitamin C content was better preserved under moderate power and longer heating times. It is concluded that microwave treatment is a viable alternative to conventional pasteurization, allowing process optimization with less nutritional and sensory impact, showing promise for the preservation of tropical juices.

Keywords: food preservation; microbiological safety; emerging technology

INTRODUÇÃO

A acerola (*Malpighia emarginata*) é uma fruta tropical reconhecida por seu elevado teor de vitamina C, antioxidantes e compostos bioativos, que conferem diversos benefícios à saúde. Além de seu valor nutricional, a acerola tem ganhado destaque como matéria-prima para a indústria alimentícia, especialmente devido à sua capacidade antioxidante e potencial funcional, que promovem a saúde e previnem doenças crônicas (1,2). O uso da acerola em sucos tem sido amplamente explorado devido ao seu sabor característico e alto valor nutricional, tornando-se uma alternativa saudável frente aos sucos convencionais. Contudo, a preservação da qualidade físico-química e microbiológica do suco é um desafio devido à sua alta perecibilidade. Processos tradicionais, como pasteurização, podem comprometer atributos sensoriais e nutricionais, o que tem incentivado a busca por técnicas inovadoras que preservam melhor as características originais da fruta (3).

Recentemente, o uso da tecnologia de micro-ondas tem emergido como uma alternativa promissora para o tratamento de sucos de frutas, incluindo a acerola. Este método apresenta vantagens na redução do tempo de processamento e na manutenção da qualidade nutricional, além de efetiva inativação microbiana. Estudos recentes destacam que o micro-ondas pode ser aplicado para otimizar a segurança microbiológica e as propriedades físico-químicas dos sucos, oferecendo uma solução eficiente para a indústria alimentícia (4).

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos do tratamento térmico por micro-ondas no suco de acerola, identificando as condições de potência e tempo mais eficazes para reduzir a carga microbiana frente ao tratamento de pasteurização convencional e analisar alterações físico-químicas e microbiológicas. Serão investigadas a eficiência na inativação de microrganismos termosensíveis, além da influência dos parâmetros operacionais nas respostas microbiológica e físico-química. O trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de processos mais eficientes e menos agressivos, garantindo a segurança microbiológica e preservando as características nutricionais e sensoriais, fortalecendo o uso de tecnologias emergentes na indústria de alimentos.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de Realização dos Experimentos

As etapas experimentais desta pesquisa foram realizadas nos laboratórios da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos (UAEALI), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizada no campus sede em Campina Grande – PB.

Matéria-prima

A matéria-prima utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi a acerola *in natura* (*Malpighia emarginata*), adquirida na EMPASA – Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas, localizada no município de Campina Grande – PB.

Obtenção do suco de acerola

Os frutos de acerola foram inicialmente lavados em água corrente e higienizados em solução de hipoclorito de sódio a 200 mg·L⁻¹ de cloro livre por 15 minutos. Após a imersão, foram enxaguados com água tratada da rede pública. O suco foi preparado em laboratório por meio de extração mecânica utilizando liquidificador doméstico da marca Britânia, BLQ 1300 FORTIS TURBO, seguido de peneiramento manual em peneira fina para remoção de resíduos sólidos. As amostras obtidas foram então submetidas aos tratamentos térmicos por micro-ondas utilizando o micro-ondas modelo Philco, PMO38E.

Tratamento Térmico

Nesta etapa, o suco de acerola foi acondicionado em garrafas de vidro transparentes estereis com capacidade de 100 mL e submetido a tratamento térmico em forno de micro-ondas doméstico com potência ajustável. Foram testadas combinações de tempo (60, 120 e 180 segundos) e potência (140 W, 280 W e 420 W), conforme delineamento fatorial 2². de acordo com a Tabela X. Uma amostra foi submetida à Pasteurização Convencional (PC), a qual foi aquecida até atingir 65 °C, permanecendo nesta temperatura por 30 minutos. A medição foi acompanhada com um termômetro de culinário digital - tipo espeto, para posterior comparação da eficácia na inativação microbiana e na preservação das propriedades físico-químicas do suco.

Todas as análises foram realizadas imediatamente após os tratamentos térmicos, visando comparar os efeitos de cada condição sobre a qualidade microbiológica e físico-química do suco.

Tabela 1 - Tratamentos térmicos aplicados ao suco de acerola por micro-ondas com diferentes combinações de tempo e potência, e pasteurização convencional.

FORMULAÇÕES	Potência(W)	Tempo (min)
F0	0	0
F1	140 (-)	60(-)
F2	140 (-)	180(+)
F3	420 (+)	60(-)
F4	420 (+)	180(+)
F5	280 (0)	120(0)
F6	280 (0)	120(0)

F7

0

0

Onde: F0: Formulação controle; F1-F6: Planejamento fatorial; F7: Pasteurização convencional

Análises microbiológicas

As análises microbiológicas consistiram na contagem de bactérias aeróbias mesófilas, bolores e leveduras, por meio de semeadura em meios de cultura apropriados e incubação em condições controladas de acordo com a metodologia proposta por, Hajdenwurcel (1998).

As análises foram realizadas através de contagem de placas (TPC) onde 100µL de suco de acerola foi misturado com ágar PCA e incubado a 36,5 °C por 24 horas e o número de colônias foi coletado e registrado as unidades formadoras de colônias por mililitro (UFC/mL). Foram incluídas ainda, as análises de bolores e leveduras (UFC/mL), visando complementar a avaliação da segurança microbiológica do suco.

Análises físico-químicas e físicas

Foram realizadas as análises físico-químicas de determinação do teor de água, pH, acidez titulável, teor de ácido ascórbico (vitamina C) e parâmetros de cor (L*, a*, b*, Chroma e Hue). Todas as análises, com exceção da avaliação da cor, foram realizadas seguindo os procedimentos descritos por Adolf Lutz (2008), garantindo a padronização metodológica e a confiabilidade dos resultados.

Análise Estatística

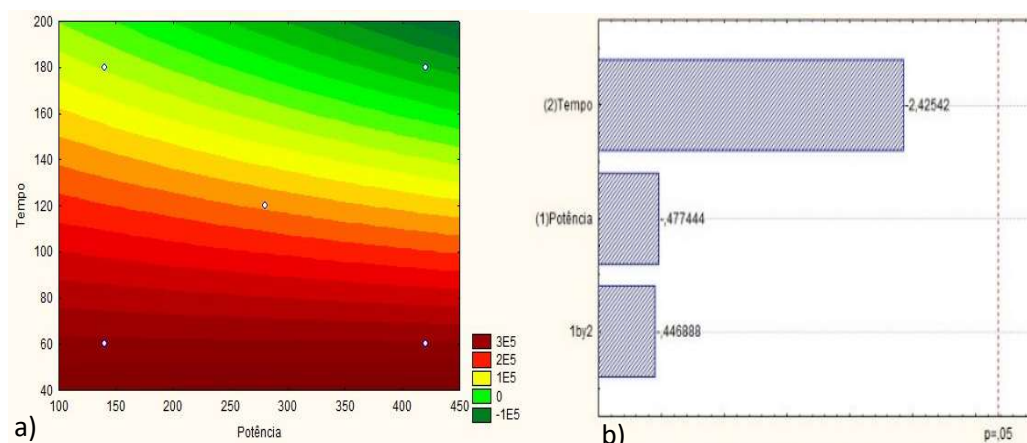
Para o delineamento fatorial utilizou-se o programa STATISTICA 12.1, que permite a elaboração dos gráficos de Pareto, superfície de resposta e curvas de contorno. Para a comparação das médias, foi aplicado análise de variância e teste de Tukey a 5% de significância, utilizando o software SISVAR.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Bolores, Leveduras e Mesófilos Aeróbios

A contagem de bolores e leveduras apresentou queda significativa com o aumento do tempo e da potência, conforme evidenciado pelo gráfico de superfície (Figura 1a). As menores concentrações microbianas foram observadas sob condições combinadas de maior tempo e potência, com áreas verdes indicando quase total inativação. O gráfico de Pareto (Figura 2b) revelou que apenas o tempo foi estatisticamente significativo (efeito = -2,43; $p < 0,05$). A potência e a interação entre os fatores mostraram efeitos menores e não significativos, mas com tendência de contribuição para a redução microbiana.

Figura 1 – Análise de Bolores e Leveduras: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.



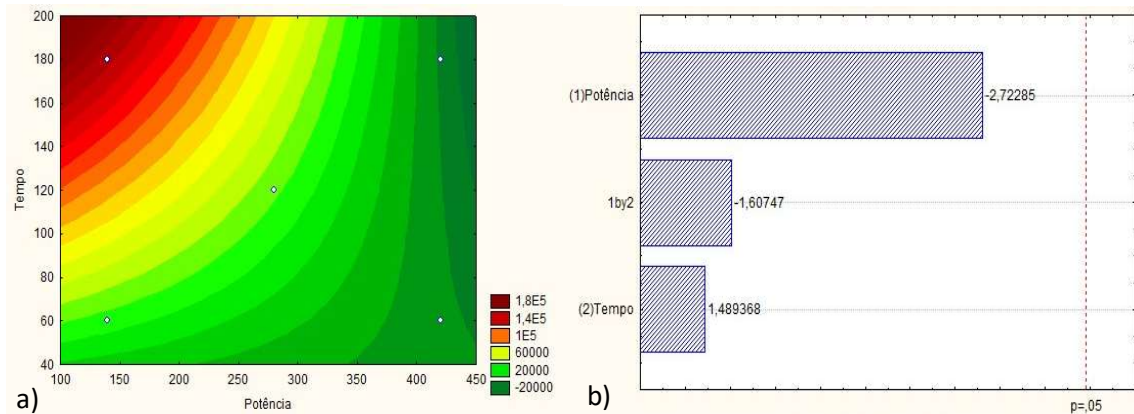
Fonte: Autores, 2025

Esses resultados apontam o tempo como o principal fator para inativação de BL no suco de acerola, reforçando a necessidade de um tempo adequado de retenção térmica. De acordo com (16), resultado semelhante foi descrito em que observaram redução expressiva de bolores e leveduras com o aumento do tempo de micro-ondas, reforçando a importância desse parâmetro no controle microbiano. Já em outro estudo, também destacam que tempos bem ajustados promovem segurança microbiológica com menor impacto nos compostos bioativos. Portanto, o controle preciso do tempo de exposição durante o processamento por micro-ondas é essencial para garantir a redução eficaz de bolores e leveduras, sem comprometer a qualidade sensorial e nutricional do produto (17).

A potência do micro-ondas mostrou-se o principal fator responsável pela redução de microrganismos mesófilos, uma vez que altas intensidades promovem elevação da temperatura interna e consequente degradação celular. Estudos como os de (14) e (4) reforçam esse efeito, destacando que potências elevadas resultam em maior inativação, enquanto o tempo atua de forma coadjuvante. Dessa forma, o ajuste adequado da potência é essencial para otimizar a eficiência do tratamento térmico por micro-ondas, assegurando a segurança microbiológica do suco de acerola com mínima perda de qualidade (18).

Os resultados experimentais estão representados na Figura 2. O gráfico de contorno (Figura 2a) evidencia que as menores contagens de microrganismos foram obtidas em regiões de alta potência (>350 W), mesmo em tempos moderados, confirmando o papel predominante da intensidade térmica na inativação. Já o gráfico de Pareto (Figura 2b) demonstra que a potência foi estatisticamente significativa (efeito = -2,72; $p < 0,05$), enquanto a interação (-1,61) e o tempo isolado (1,49) apresentaram apenas influência complementar, sem significância estatística.

Figura 2 – Análise de microrganismos mesófilos aeróbios: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.

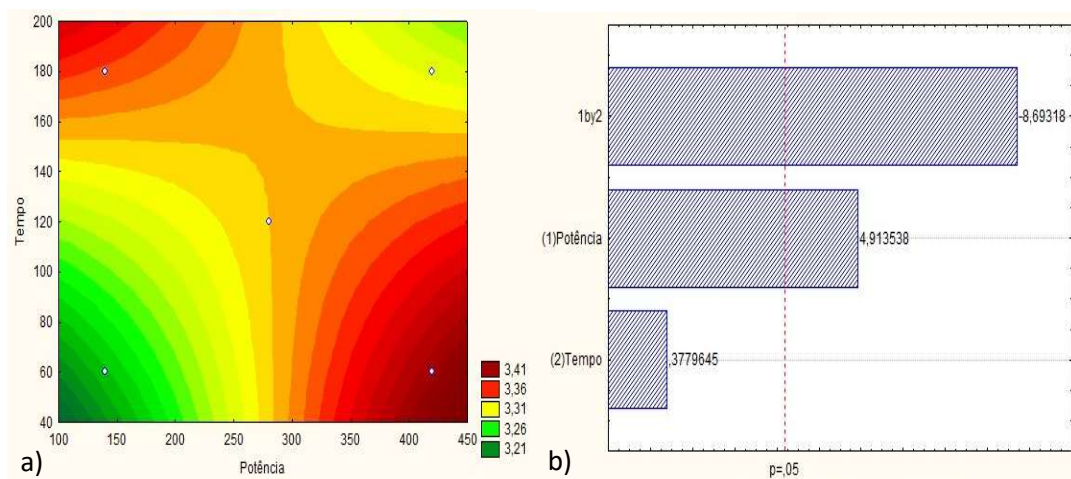


Fonte: Autores, 2025.

pH

O comportamento do pH do suco de acerola foi influenciado pelas variáveis tempo e potência do micro-ondas. De acordo com o gráfico de contorno (Figura 3a), os menores valores (~3,21) foram observados em condições intermediárias, como potência moderada (140 W) e tempo reduzido (60 s). Já nas bordas do gráfico, que representam tratamentos mais intensos, ocorreu elevação gradual do pH (~3,41). As regiões em tons verdes indicam valores mais ácidos, típicos de tratamentos leves, enquanto os tons alaranjados/vermelhos refletem maior pH, associado a condições mais severas. Esse efeito pode estar relacionado à degradação de ácidos orgânicos e à formação de compostos alcalinos decorrentes de reações de Maillard.

Figura 3 – Gráficos de análise de pH: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.



Fonte: Autores, 2025

O gráfico de Pareto (Figura 3b) reforça esses achados ao mostrar que tanto a interação entre tempo e potência (efeito = 8,69) quanto a potência isolada (efeito = 4,91) foram estatisticamente significativas ($p < 0,05$), confirmando seu papel determinante sobre o pH. Em contrapartida, o tempo

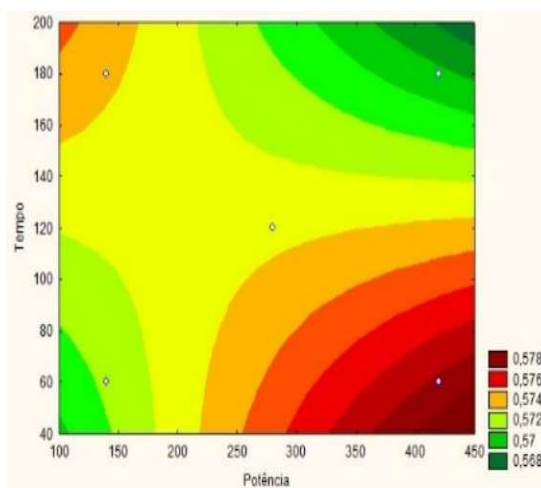
isolado (efeito = 0,38) não apresentou significância, indicando que seu impacto depende da associação com a potência.

A análise estatística revelou que a interação tempo x potência (efeito = 8,69) e a potência isolada (efeito = 4,91) foram estatisticamente significativas ($p < 0,05$), enquanto o tempo sozinho não apresentou significância (efeito = 0,38), confirmando o papel combinado dos fatores sobre o pH. Estudos anteriores reforçam esses achados: o micro-ondas preserva melhor os compostos bioativos e altera propriedades físico-químicas de forma distinta da pasteurização convencional (5), e também promove alterações significativas no pH e estabilidade de compostos em bebidas funcionais (6).

Acidez Titulável

A acidez titulável (ATT) do suco de acerola foi influenciada pelas variáveis tempo e potência do micro-ondas. O gráfico de contorno (Figura 4) mostrou menores valores (~0,568) em condições intermediárias (~250 W e 120 s), enquanto tratamentos mais intensos, localizados nas bordas do gráfico, resultaram em aumento da acidez. Esse comportamento sugere um equilíbrio entre a degradação de ácidos orgânicos e a preservação de compostos tamponantes, indicando que condições moderadas de processamento favorecem a manutenção da acidez natural do suco.

Figura 4 - Análise de acidez titulável: Gráfico de contorno.



Fonte: Autores, 2025.

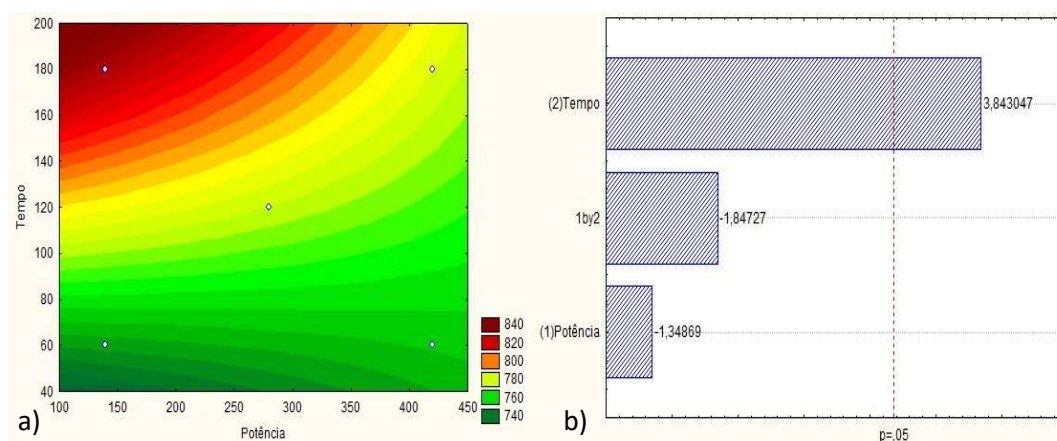
Esses achados são consistentes com estudos que relatam maior preservação da acidez sob aquecimento moderado e aumento da liberação de ácidos em tratamentos mais severos (7–9), reforçando a ATT como parâmetro crítico para a otimização da do tratamento térmico por micro-ondas.

Ácido Ascórbico (Vitamina C)

A concentração de vitamina C no suco de acerola variou em função do tempo e da potência do micro-ondas. O gráfico de contorno (Figura 5a) evidenciou maiores teores em condições suaves, como baixa potência (140 W) associada a tempo prolongado (60 s), representadas pelas áreas em vermelho. Em contrapartida, tratamentos mais intensos, especialmente a combinação de alta potência (420 W) com tempo reduzido, resultaram nas menores concentrações, destacadas pelas áreas em verde, indicando que a degradação é mais acentuada sob aquecimento rápido e intenso.

O gráfico de Pareto (Figura 5b) confirmou que apenas o tempo foi estatisticamente significativo ($p < 0,05$), com efeito padronizado de 3,84, enquanto a potência e a interação não apresentaram significância. Esses resultados indicam que o tempo de exposição é o fator mais crítico para a preservação da vitamina C durante o processamento por micro-ondas.

Figura 5 – Análise de Ácido ascórbico: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.



Fonte: Autores, 2025.

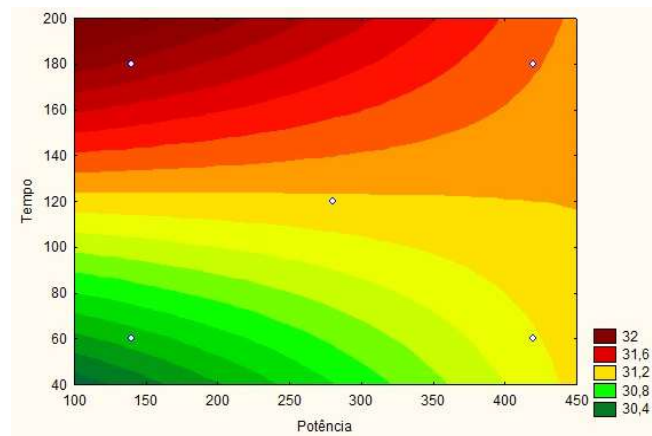
Estudos recentes corroboram esses achados, mostrando que condições suaves de processamento favorecem a preservação de compostos bioativos em bebidas de citros e maqui (10), bem como em sucos cítricos (11). De forma semelhante, em suco de laranja foi observado que o aumento da severidade térmica acelerou a degradação da vitamina C, reforçando, assim como em nosso estudo, que o tempo é o fator determinante para sua preservação (21).

Parâmetros de Cor (L, a, b*, Chroma e Hue)**

L (Luminosidade)*

A variável L* foi influenciada principalmente pelo tempo de exposição ao micro-ondas, como demonstrado nos gráficos de superfície e contorno (Figura 5). Observou-se redução dos valores de luminosidade com o aumento do tempo de processamento, indicando escurecimento progressivo do suco.

Figura 5 – Análise de Cor -L: Gráfico de contorno.



Fonte: Autores, 2025.

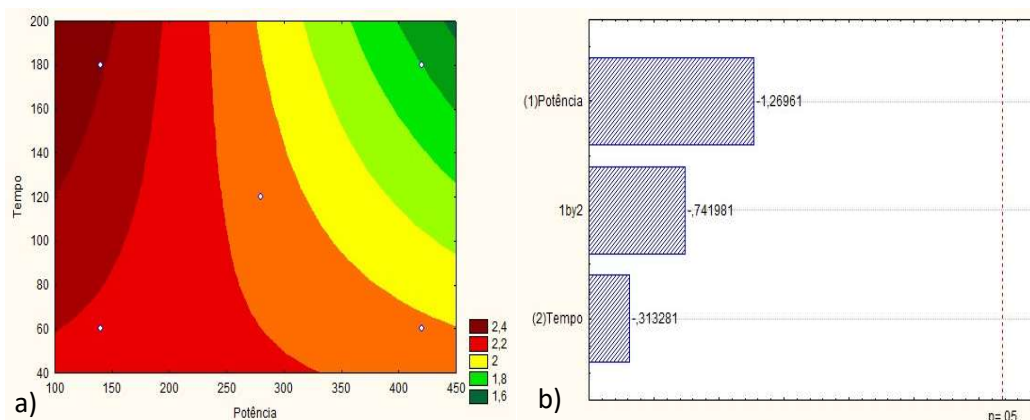
As maiores intensidades de L^* foram registradas em tempos curtos, independentemente da potência. Esse comportamento está relacionado à degradação de pigmentos termossensíveis, como antocianinas e carotenóides, além da possível formação de pigmentos escuros oriundos de reações de Maillard e caramelização. Esses resultados estão de acordo com estudos anteriores onde observaram que tratamentos mais intensos em mirtilos reduziram o parâmetro L^* , indicando escurecimento, assim como em nosso estudo, onde condições suaves preservaram melhor a claridade do suco de acerola (12).

De forma geral, o controle do tempo de exposição se mostra essencial para a manutenção da luminosidade, parâmetro diretamente relacionado à qualidade visual e aceitação sensorial. Estratégias que combinem potências mais altas com tempos curtos podem minimizar os efeitos negativos sobre a cor, desde que bem controladas.

a (Matiz vermelho/verde)*

A variável a^* , que indica a intensidade da coloração vermelha, foi reduzida com o aumento da potência do micro-ondas, como evidenciado no gráfico de superfície (Figura 6a). Os menores valores de a^* (~1,6 a 2,0) foram registrados sob condições de alta potência e tempo prolongado, refletindo perda de pigmentos vermelhos como antocianinas e licopeno.

Figura 6 – Análise de Cor - a: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.



Fonte: Autores, 2025.

O gráfico de Pareto (Figura 6b) confirmou que a potência foi o fator com maior efeito negativo padronizado (-1,27), sendo o único estatisticamente significativo ($p < 0,05$). A interação tempo x potência apresentou efeito intermediário (-0,74), enquanto o tempo isolado teve o menor impacto (-0,31), indicando que a intensidade térmica tem maior influência que a duração. Esse padrão está relacionado à degradação térmica de pigmentos naturais e à oxidação de compostos fenólicos sensíveis ao calor. Um estudo mostrou que o aumento da potência do micro-ondas em fatias de cenoura levou à diminuição do parâmetro a^* , indicando perda de pigmentos vermelhos. Esse padrão é consistente com nossos resultados em suco de acerola, nos quais valores de a^* mais baixos foram registrados sob alta potência, reforçando que a intensidade térmica é o fator predominante na degradação de pigmentos naturais e na redução da coloração vermelha (13).

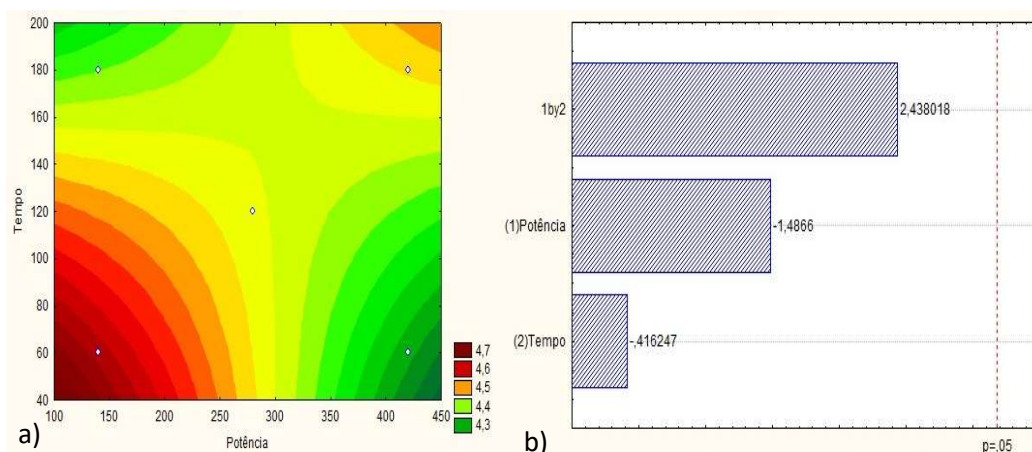
De forma geral, a variável a^* é fortemente afetada pela potência aplicada, sendo necessário ajustar cuidadosamente os parâmetros de processamento para minimizar a degradação da coloração vermelha e preservar a qualidade visual do produto.

b (Matiz amarelo/azul)*

A variável b^* apresentou comportamento dependente da interação entre tempo e potência, com os maiores valores em condições intermediárias (~250 W e 120 s), como evidencia o gráfico de superfície (Figura 7a). Condições extremas resultaram em menor resposta, indicando que tanto excesso quanto insuficiência de energia prejudicam a preservação da cor.

O gráfico de Pareto (Figura 7b) apontou a interação entre os fatores como o efeito mais significativo (efeito = 2,44; $p < 0,05$), seguido da potência isolada (-1,49). O tempo, isoladamente, não foi significativo. Esse resultado demonstra que não apenas os fatores isolados, mas especialmente sua combinação, é determinante para a maximização da resposta.

Figura 7 – Análise de Cor - b: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.



Fonte: Autores, 2025.

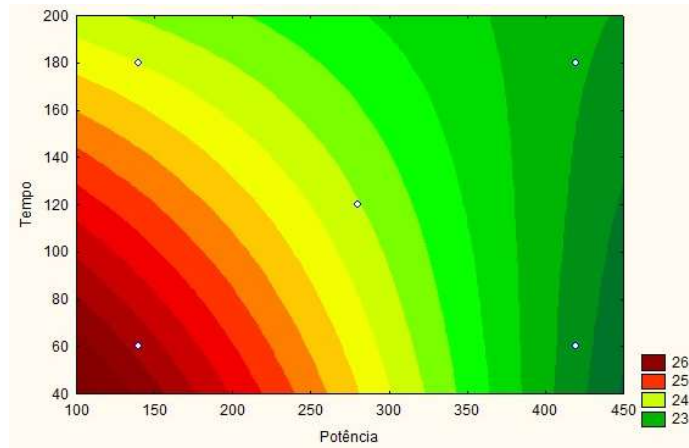
No contexto do presente trabalho, os dados sugerem a existência de uma faixa operacional ótima, na qual o equilíbrio entre tempo e potência promove melhores respostas para b^* , possivelmente associadas à integridade, estabilidade e rendimento do material processado. Estudo recente onde investigaram a influência da radiação de micro-ondas na perda da cor verde em pó de chá verde, foi observado que o aumento da potência acelera o escurecimento, com a estabilidade da cor sendo afetada tanto pelo tempo quanto pela intensidade do tratamento. Esses resultados são semelhantes aos nossos, que indicam que a faixa operacional ótima de potência e tempo é crucial para manter a estabilidade da cor em produtos vegetais processados por micro-ondas (14).

Chroma (Intensidade da cor)

A intensidade da cor (chroma) diminuiu com o aumento da potência e do tempo de exposição ao micro-ondas. Os maiores valores foram observados em condições de baixa potência (100–200 W) e tempos curtos, sugerindo que temperaturas mais baixas evitam a degradação de pigmentos sensíveis como as antocianinas. Esses resultados são reforçados por estudos que demonstram que o aumento da temperatura provoca degradação das antocianinas, reduzindo a intensidade da cor, o que confirma nossos achados: maior potência e tempo no micro-ondas diminuíram o chroma. Assim, condições de baixa potência e tempo curto preservam melhor os pigmentos sensíveis (15).

O comportamento do chroma em função das variáveis de processo pode ser visualizado no gráfico de superfície (Figura 8).

Figura 8 – Análise de Cor - b: Gráfico de contorno.



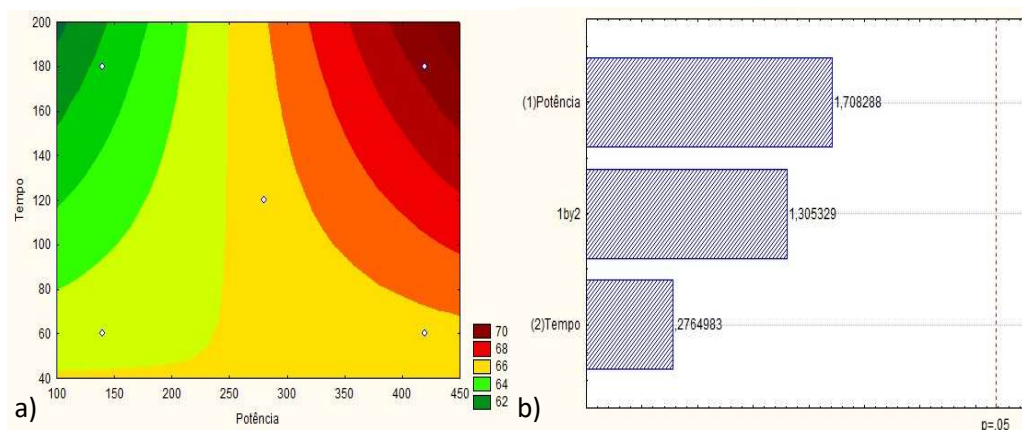
Fonte: Autores, 2025.

Os gradientes observados nas figuras revelam que, mesmo com tempo reduzido, o aumento da potência compromete a intensidade da cor, impactando diretamente na aparência e aceitação visual do produto. Dessa forma, o uso de baixas potências se mostra mais favorável à preservação da coloração, indicando a importância da otimização dos parâmetros térmicos para garantir a qualidade visual e funcional do suco processado.

Hue (Ângulo tonal)

O ângulo de matiz (hue) aumentou com a elevação da potência do micro-ondas, como mostra o gráfico de superfície (Figura 9a) indicando mudança na coloração do suco para tons mais amarelados. Esse comportamento está relacionado à degradação de pigmentos vermelhos e à formação de compostos oriundos de reações de escurecimento não enzimático.

Figura 9 – Análise de Cor - Hue: (a) Gráfico de contorno, (b) gráfico de Pareto.



Fonte: Autores, 2025.

O gráfico de Pareto (Figura 9b) apontou a potência como o fator de maior efeito padronizado (1,71), embora sem significância estatística. A interação entre tempo e potência também teve influência considerável (1,31), enquanto o tempo isolado exerceu impacto reduzido (0,28). Esses resultados indicam que a alteração do hue depende mais da intensidade energética do que da duração.

Em contraste, estudos com a secagem de abobrinha por micro-ondas mostrou que o aumento de potência e tempo reduziu o hue, indicando alteração da cor para tonalidades menos saturadas. Isso sugere que, embora o hue seja sensível à intensidade energética, a direção da mudança depende da estabilidade dos pigmentos de cada alimento (23). Assim, o processamento por micro-ondas requer ajustes de tempo e potência para minimizar perdas visuais, já que a preservação da cor depende do controle térmico sobre os compostos cromofóricos naturais.

Análise Estatística: Teste de Tukey

Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA) de acordo com as Tabelas 2, 3 e 4, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$), a fim de verificar os efeitos principais e suas interações no modelo fatorial 2^2 . Para as variáveis que apresentaram diferença significativa, foi aplicado o teste de médias de Tukey para comparação entre os tratamentos.

Tabela 2 – Médias das análises do suco de acerola sob diferentes tratamentos térmicos

Potência	tempo	ATT (g/100g)	TA (%)	pH	Vit C (g/100g)
0	0	0,5602± 0,0020 b	98,0050± 0,0917 ba	3,22± 0,03 b	0,7445± 0,0274 ns
140	60	0,5745± 0,0103 ba	97,9267± 0,0577 ba	3,23± 0,07 b	0,7415± 0,0231 ns
140	180	0,5817± 0,0162 ba	97,5533± 0,4186 b	3,32± 0,08 ba	0,8277± 0,1440 ns
280	60	0,5843± 0,0061 ba	97,9100± 0,03 ba	3,39± 0,03 a	0,7855± 0,0328 ns
280	180	0,5701± 0,0125 ba	97,9467± 0,1021 ba	3,30± 0,04 ba	0,7833± 0,0472 ns
240	120	0,5681± 0,0126 ba	98,0700± 0,0984 a	3,3233± 0,0152 ba	0,7561± 0,0194 ns
240	120	0,5757± 0,003163 ba	97,8967± 0,09176 ba	3,3300± 0,04 ba	0,7876± 0,059559 ns
PC	-	0,5986± 0,0155 a	97,7200± 0,00577 ba	3,3100± 0,0173 ba	0,7911± 0,0092 ns

Letras iguais na linha indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autores, 2025.

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas do suco de acerola submetido a diferentes combinações de potência (W) e tempo (s) de tratamento térmico por micro-ondas, além da pasteurização convencional (PC) como controle. As variáveis analisadas foram acidez titulável (ATT), teor de água (TA), pH, vitamina C (Vit C), contagem de mesófilos e bolores. As letras sobrescritas (a, b, c, etc.) indicam os resultados do teste de comparação múltipla de médias (Teste de Tukey a 5% de significância), realizado após análise de variância (ANOVA). Médias que compartilham ao menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si, enquanto aquelas com letras diferentes indicam diferenças significativas.

Na Tabela 3, foram apresentados os resultados das contagens microbiológicas de microrganismos mesófilos e bolores (UFC/mL) nos diferentes tratamentos aplicados ao suco de acerola. Os dados estão expressos como média \pm desvio padrão, e as letras minúsculas indicam

diferenças significativas entre os tratamentos para mesófilos, conforme teste de Tukey ($p < 0,05$). Para as contagens de bolores, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos.

Tabela 3 - Contagem de microrganismos mesófilos e bolores (UFC/mL) no suco de acerola submetido a diferentes tratamentos térmicos.

Mesófilos (UFC/mL)	Bolores (UFC/mL)
1,6 x 10 ⁶ ± 3,9 x 10 ⁴ ba	1,10 x 10 ⁶ ± 7,1 x 10 ⁴ ns
2,15 x 10 ⁶ ±	1,21 x 10 ⁵ ± 5 x 10 ⁵ NS
9,6 x 10 ⁵ ba	1,37 x 10 ⁶ ±
4,2 x 10 ⁵ ± 9,81 x 10 ⁶ ba	7,4 x 10 ⁴ ns
0,35 ± x 3,5 x 10 ⁵ b	0,02 ± 1,54 x 10 ⁴ ns
2,4 x 10 ⁴ ± 0 b	7,26 x 10 ⁴ ± 0 ns
1,4 x 10 ⁶ ±	
1,23 x 10 ⁶ ± b	1,10 X 10 ⁶ ± 1 x 10 ⁶ ns
2,0 x 10 ² ± 3,46 x 10 ² b	1,73 X 10 ⁵ ± 1,53 x 10 ⁴ Ns
0±0 b	0±0 ns

UFC/mL = Unidades formadoras de colônia por mililitro; ns = *Not significant*, ou seja, não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$); ba, b = Letras minúsculas indicam grupos estatisticamente diferentes para mesófilos.

Fonte: Autores, 2025.

A Tabela 4 descreve os parâmetros de cor do suco de acerola submetido a diferentes tratamentos térmicos por micro-ondas e pasteurização convencional. Observou-se que a luminosidade (L^*), maior no controle (36,55), foi reduzida após os tratamentos, indicando escurecimento do produto possivelmente por degradação de pigmentos ou reações de Maillard. Os valores de a^* (vermelho) variaram pouco entre os tratamentos, sugerindo leve alteração da coloração avermelhada. Já o componente b^* (amarelo) foi mais elevado na pasteurização convencional, o que indica tendência ao amarelecimento. O ângulo de matiz (Hue°) aumentou após os tratamentos, com valores mais altos nos tratamentos mais intensos, revelando desvio da tonalidade original. Por fim, o Chroma foi maior na pasteurização convencional (29,26), refletindo

maior saturação da cor, embora alguns tratamentos por micro-ondas (como 240 W/120 s) também tenham mantido boa intensidade de cor. Esses resultados mostram que os tratamentos térmicos afetam a aparência visual do suco, sendo possível obter bons resultados com micro-ondas em condições otimizadas.

Tabela 4 - Parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , Hue° e Chroma*) do suco de acerola submetido a diferentes combinações de potência e tempo no tratamento por micro-ondas, além da pasteurização convencional.

Potência	tempo	L^*	a^*	b^*	Hue°	Chroma*
0	0	36,5500± 0,4073a	2,0400± 0,0529ba	3,5233± 0,0404b	59,300± 0,4107b	16,5767± 0,486038d
140	60	30,2833± 0,4389c	1,7467± 0,1913ba	4,5467± 0,1137ba	68,9700± 2,54033ba	23,7500± 0,549454c b
140	180	30,6900± 0,0435cb	1,7000± 0,4794ba	4,3733± 0,0208ba	68,9000± 5,27875ba	22,1667± 1,873668c
280	60	30,3733± 0,2657c	1,7067± 0,2627ba	4,2267± 0,1686ba	67,9967± 3,57951ba	20,8367± 1,142862c
280	180	30,2033± 0,0750c	1,4900± 0,2455b	4,4900± 0,0916ba	71,6767± 2,62071a	22,4200± 1,390719c
240	120	30,3567± 0,2490c	2,1433± 0,1814ba	3,7233± 1,1893b	65,2433± 0,34063ba	23,5100± 0,190526c b
240	120	30,8767± 0,67678cb	2,4367± 0,3888ba	4,4233± 0,184481b a	61,1667± 4,85157b	25,6233± 0,590706b
PC	-	31,7000± 0,51739b	1,9900± 0,2615a	5,0300± 0,2402b	68,4100± 3,43602ba	29,2600± 1,50961a

L^* = Luminosidade; a^* = Componente vermelho (+)/verde (-); b^* = Componente amarelo (+)/azul (-); Hue° = Ângulo de matiz (tonalidade da cor); Chroma = Saturação ou intensidade da cor; PC = Pasteurização Convencional.

Fonte: Autores, 2025.

De modo geral, observam-se alterações importantes em função dos tratamentos térmicos, especialmente nas variáveis cor (parâmetros L^* , a^* , b^* , Hue° e Chroma*), indicando que o processamento por micro-ondas modificou a aparência do suco. A contagem de mesófilos e bolores foi significativamente reduzida após os tratamentos, sendo nula em alguns casos, demonstrando a eficácia do processamento térmico na inativação microbiana. A vitamina C apresentou variações, mas sem diferenças estatísticas relevantes (ns) entre alguns tratamentos, indicando que o micro-

ondas pode preservar parcialmente este nutriente, dependendo da combinação de tempo e potência. O pH, de forma geral, manteve-se estável, com pequenas variações sem significância estatística em determinados tratamentos. Portanto, a tabela evidencia que a combinação de potência e tempo influencia significativamente diversas propriedades do suco, reforçando a importância da otimização dos parâmetros de processamento térmico para a manutenção da qualidade físico-química e microbiológica.

De forma semelhante ao nosso estudo, estudaram a inativação de *Escherichia coli* em suco de laranja com micro-ondas a 900 W por 33 segundos combinadas com ultrassom por 20 minutos. A combinação dos tratamentos foi mais eficaz que cada um isoladamente, alcançando uma redução de 8 log na contagem bacteriana, mostrando inativação total do patógeno (19).

CONCLUSÕES

O tratamento térmico por micro-ondas mostrou-se uma alternativa viável para a redução da carga microbiana no suco de acerola, com potencial para preservar parâmetros físico-químicos e sensoriais, a depender da combinação entre tempo e potência aplicada. A escolha criteriosa desses parâmetros permite alcançar um equilíbrio entre segurança microbiológica e manutenção da qualidade nutricional e sensorial do produto. As evidências sugerem que potências moderadas associadas a tempos mais longos favorecem a preservação da vitamina C e das características de cor, ao mesmo tempo em que promovem a inativação eficaz de bolores e leveduras. Adicionalmente, os resultados obtidos, com base na análise estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), indicaram que as variáveis tempo e potência influenciaram significativamente as propriedades avaliadas, com destaque para a alteração nos parâmetros de cor, a redução da carga microbiana e a conservação parcial da vitamina C. Esses achados reforçam a importância da otimização do processo de micro-ondas como ferramenta estratégica para o desenvolvimento de produtos com maior valor agregado e estabilidade.

REFERÊNCIAS

1. Sattar S, Imran M, Mushtaq Z, Ahmad MH, Arshad MS, Holmes M, Maycock J, Nisar MF, Khan MK. Retention and stability of bioactive compounds in functional peach beverage using pasteurization, microwave and ultrasound technologies. *Food Sci Biotechnol*. 2020;29(10):1381-8. doi:10.1007/s10068-020-00797-5.
2. Amaro KC, Russo G, Fan DL, Gut JAW, Tadini CC. Modeling and experimental validation of the time-temperature profile, pectin methylesterase inactivation, and ascorbic acid degradation during the continuous flow microwave-assisted pasteurization of orange juice. *Food and Bioprocess Processing*. 2024;144:1–12. doi:10.1016/j.fbp.2024.01.015.
3. Arjmandi M, Otón M, Artés-Hernández F, Gómez PA, Artés F, Aguayo E. Effect of microwave pasteurization on the quality of orange-colored smoothies. *J Food Sci Technol*. 2016;53(7):3695–703. doi:10.1007/s13197-016-2342-5.
4. Arslan D, Özcan MM. Investigation of microwave application time with constant pulse ratio on drying

- of zucchini. *Food Sci Nutr*. 2023;11(19):6956-66. doi:10.1002/fsn3.3458.
5. Belwal T, Devkota PH, Hassan AH, Ahluwalia S, Ramadã FM, Atanasov GA. Phytopharmacology of acerola (*Malpighia* spp.) and its potential as a functional food. *Trends Food Sci Technol*. 2018;74:99-106. doi:10.1016/j.tifs.2018.01.014.
 6. Çetin N, Günaydın S. The effect of gradually increasing microwave power on the drying kinetics, color parameters, and energy aspects of carrots. *J Food Eng*. 2024;370:111456. doi:10.1016/j.jfoodeng.2024.110456.
 7. Hajdenwurcel, Judith Regina. *Atlas de microbiologia de alimentos: Volume I*. São Paulo: Fonte Comunicações e Editora, 1998.
 8. Jayaprakash P, Mehta S, Kumar A. Effects of microwave processing on physicochemical properties of citrus juices. *Food Res Int*. 2023;164:112742. doi:10.1016/j.foodres.2023.112742.
 9. Kernou ON, Ait-Amar Z, Bensouici A, Kheroua G, Kaddour K, Allaf K. Inactivation of *Escherichia coli* in an Orange Juice Beverage by Combined Ultrasonic and Microwave Treatment. *Foods*. 2023;12(3):666. doi:10.3390/foods12030666.
 10. Kumar S, Singh P, Patel R. Influence of microwave power and treatment time on microbial safety of fruit juices. *J Food Sci Technol*. 2021;58(6):2200-8. doi:10.1007/s13197-020-04738-1.
 11. Lamdande AG, Khabeer ST, Kulathooran R, Dasappa I. Application of microwave treatment for reduction of microbial load in jaggery cubes. *J Food Sci Technol*. 2023;60:1513–20. doi:10.1007/s13197-023-05692-5.
 12. López-Malo A, Alzamora SM, Palou E. Impact of thermal processing on acidity and quality attributes of fruit juices: A review. *Food Control*. 2021;127:108016. doi:10.1016/j.foodcont.2021.108016.
 13. Mendonça KS, Corrêa JG, Junqueira JRJ, Souza AU. Two-stage power level to improve microwave vacuum drying of restructured Peruvian carrot chips. *Ciênc Agrotec*. 2023;47(1):e010523.
 14. Nasiri A, Alvandi F, Hosseini SMH, Farahmandfar R. Application of microwave treatment on the quality of citrus juice: A kinetic modeling study. *LWT*. 2021;149:112999. doi:10.1016/j.lwt.2021.112999.
 15. Nema RK, Jain D, Dubey A, Patel A. Effect of microwave treatment on fungal inactivation in fruit juices: A study on microbiological safety and quality. *J Food Sci Technol*. 2021;58(7):2661-70. doi:10.1007/s13197-020-04613-5.
 16. Norouzi S, Orsat V, Dumont M-J. Improving Dehydration Efficiency and Quality in Highbush Blueberries via Combined Pulsed Microwave Pretreatment and Osmotic Dehydration. *Agriculture (Basel)*. 2025;15(15):1602. doi:10.3390/agriculture15151602.
 17. Salar FJ, Díaz-Morcillo A, Fayos-Fernández J, Monzó-Cabrera J, Sánchez-Bravo P, Domínguez-Perles R, et al. Microwave treatment vs. conventional pasteurization: The effect on phytochemical and microbiological quality for citrus–maqui beverages. *Foods*. 2024;13(1):101. doi:10.3390/foods13010101.
 18. Salar FJ, Díaz-Morcillo A, Fayos-Fernández J, Monzó-Cabrera J, Sánchez-Bravo P, Domínguez-Perles R, Fernández PS, García-Viguera C, Periago PM. Microwave treatment vs. conventional pasteurization: The effect on phytochemical and microbiological quality for citrus–maqui beverages. *Foods*. 2024;13(1):101. doi:10.3390/foods13010101.
 19. Salar FJ, Díaz-Morcillo A, Fayos-Fernández J, Monzó-Cabrera J, Sánchez-Bravo P, Domínguez-Perles R, Fernández PS, García-Viguera C, Periago PM. Microwave treatment vs. conventional pasteurization: The effect on phytochemical and microbiological quality for citrus–maqui beverages. *Foods*. 2024;13(1):101. doi:10.3390/foods13010101.
 20. Silva, N. L., Crispim, J. M. S., & Vieira, R. P. (2022). Cinética da degradação térmica de antocianinas de alaybilí (*Vaccinium floribundum* Kunth) e macha-macha (*Gaultheria glomerata* (Cav.) Sleumer). *Brazilian Journal of Food Technology*, 25, e2022.
 21. Singh R, Kumar P. Influence of microwave heating parameters on the quality of processed fruit juices. *LWT*. 2022;154:113000. doi:10.1016/j.lwt.2022.113000.

22. Wang H, Zhu Y, Xie D, Zhang H, Zhang Y, Jin P, Du Q. The effect of microwave radiation on the green color loss of green tea powder. *Foods*. 2022;11(16):2540. [doi: 10.3390/foods11162540](https://doi.org/10.3390/foods11162540).
23. Xu M, Shen C, Zheng H, Xu C, Zhu B, Hu J. Metabolomic analysis of acerola cherry (*Malpighia emarginata*) fruit during ripening development via UPLC-Q-TOF and contribution to the antioxidant activity. *Food Res Int*. 2020;130:108915. doi:10.1016/j.foodres.2019.108915.