

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANA ASSOCIADAS A NANO CERA DE
ABELHA COMO RECOBRIMENTO PARA CONSERVAÇÃO DE LIMA ÁCIDA
TAHITI**

JUSSARA CLARA DOMINGUES LIMA

Orientador: Jáiro Osvaldo Cazetta

Coorientadoras: Poliana Cristina Spricigo e Vanessa Maria Dantas Pedrosa

Trabalho apresentado à Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias -
UNESP, Câmpus de Jaboticabal,
para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

1º Semestre/2026

L732n

Lima, Jussara Clara Domingues

Nanopartículas de Quitosana associadas a nano cera de abelha como recobrimento para conservação de Lima Ácida Tahiti / Jussara Lima. -- Jaboticabal, 2026

46 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Jáiro Osvaldo Cazetta Cazetta

Coorientadora: Poliana C. Spricigo e Vanessa Maria Dantas

1. Pós-colheita. 2. Revestimentos. 3. Quitosana. 4. Nanotecnologia. 5.

Citros.

I. Título.

Jussara Clara Domingues Lima

NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANA ASSOCIADAS A NANO CERA DE ABELHA COMO RECOBRIMENTO PARA CONSERVAÇÃO DE LIMA ÁCIDA TAHITI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em **Engenharia Agrônômica**.

Orientador: Prof Dr. Jáiro Osvaldo Cazetta.

Coorientador (se houver): Prof Dra. Poliana Cristina Spricigo e Dra. Vanessa Maria Dantas Pedrosa

Área de Concentração: Tecnologia de pós-colheita

Trabalho aprovado em 29/05/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 POLIANA CRISTINA SPRICIGO
Data: 29/05/2026 17:14:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof Dra. Poliana Cristina Spricigo
UNESP - Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Araraquara

Documento assinado digitalmente
 KELLY MAGALHAES MARQUES
Data: 01/06/2026 20:50:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Draº Kelly Magalhães Marques
ESPD | Escola Superior de Pesquisa e Desenvolvimento

Documento assinado digitalmente
 NILO RICARDO CORREA DE MELLO JUNIOR
Data: 02/06/2026 09:18:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Nilo Ricardo Corrêa de Melo Junior
UNESP - Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Araraquara

Documento assinado digitalmente
 HIRASILVA BORBA
Data: 07/07/2026 15:23:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Hirasilva Borba
Chefe do Departamento

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos,
que sempre foram minha inspiração, meu apoio e minha maior
motivação para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, saúde e por guiar meus passos ao longo de toda essa trajetória.

À minha família, em especial à minha mãe, Valdete, por todos os anos de dedicação, amor e companheirismo, fundamentais para a minha formação pessoal e profissional. À minha avó, pelo carinho de sempre, e ao meu irmão, pelo apoio constante ao longo dessa jornada.

Ao ingressar na UNESP em 2021, em meio ao período de pandemia, iniciei minha trajetória acadêmica de forma desafiadora, sem conhecer pessoas e enfrentando o ensino remoto. Foi nesse cenário que encontrei minha segunda casa, a minha querida república 4x4, que se tornou parte essencial da minha caminhada, tornando essa experiência única e inesquecível. Sou profundamente grata por ter escolhido viver ao lado de vocês, compartilhando quatro anos tão especiais.

Aos meus orientadores e a toda a equipe do laboratório, pela dedicação, apoio e ensinamentos ao longo deste projeto. Em especial, à Vanessa e à Kelly, pelo acompanhamento durante todo o desenvolvimento do trabalho; à Poliana, pelo carinho, dedicação e pelas inúmeras contribuições ao longo dessa trajetória; e ao Jáiro, que gentilmente aceitou, de última hora, assumir a orientação.

Ao Eng. Agr. Diogo Davoglio pelo fornecimento das limas ácidas Tahiti para a condução do experimento.

À minha namorada, Letícia, pelo apoio constante, incentivo e por ter participado ativamente deste experimento, estando ao meu lado em todos os momentos em que precisei.

Aos amigos Júlia, Heitor, Giulia e Maria Eduarda, que fizeram parte dessa jornada e contribuíram para que essa trajetória fosse repleta de carinho, apoio e momentos inesquecíveis.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

SÚMARIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	5
SUMMARY	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1 Lima ácida Tahiti	9
2.2 Recobrimentos na conservação pós-colheita de frutos.....	12
2.3 Quitosana na formulação de recobrimentos	13
2.4 Cera de abelha na formulação de recobrimentos	14
2.5 Nanotecnologia na formulação de recobrimentos para aplicação em frutos.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Material Vegetal	17
3.2 Preparo dos Recobrimentos.....	18
3.2.1 Nanopartícula de quitosana.....	18
3.2.2 Nanopartículas de cera de abelha.....	18
3.2.3 Formulações base do recobrimento contendo nanopartículas de cera de abelha	19
3.2.4 Recobrimentos à base de nanopartículas de quitosana e cera de abelha	19
3.3. Caracterização da nanopartícula de quitosana e da nanopartícula de cera de abelha.	19
3.4 Instalação do experimento	20
3.4.1 Análises de qualidade dos frutos.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
4.1. Caracterização da nanopartícula de quitosana e da nanopartícula de cera de abelha	23
4.2 Análises de qualidade dos frutos.....	27
CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS	39
MATERIAL SUPLEMENTAR.....	44

RESUMO

A lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia* Yu. Tanaka) apresenta elevada relevância econômica no Brasil, entretanto, sua qualidade pós-colheita é limitada por alterações fisiológicas que comprometem a aparência, a vida útil e o valor comercial dos frutos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo, desenvolver e avaliar a eficiência e o desempenho em vários parâmetros de conservação de revestimentos nanoestruturados à base de quitosana e cera de abelha na conservação pós-colheita de lima ácida Tahiti. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por cinco tratamentos: T0 (controle, sem aplicação de recobrimento), T1 (recobrimento contendo nanopartículas de cera de abelha), T2 (recobrimento à base de nanopartículas de quitosana), T3 (recobrimento contendo associação de nanopartículas de quitosana e nanopartículas de cera de abelha 5%) e T4 (recobrimento contendo associação de nanopartículas de quitosana e nanopartículas de cera de abelha 10%), com armazenamento por 11 dias a 21 °C e quatro datas de avaliação (0; 4; 8 e 11 dias), utilizando-se 3 repetições com 10 frutos cada. Foram avaliadas variáveis físico-químicas, incluindo perda de massa fresca, sólidos solúveis, acidez titulável, teor de ácido ascórbico, pigmentos (clorofilas e carotenoides), incidência de podridão e oleocelose. Os resultados para os revestimentos nanoestruturados, especificamente T1 e T2, mostraram redução da perda de massa fresca dos frutos ao longo do armazenamento, indicando efeito na diminuição da perda de água. Não foram observadas diferenças significativas na incidência de podridão e oleocelose entre os tratamentos. Em relação à qualidade química, os tratamentos T1 e T4 apresentaram maior manutenção dos sólidos solúveis, enquanto T2 e T4 destacaram-se no rendimento de suco. O tratamento T1 demonstrou maior eficiência na preservação dos pigmentos, com maior manutenção dos teores de clorofilas e carotenoides, contribuindo para a conservação da coloração verde dos frutos sendo, portanto, o tratamento que obteve melhor conservação pós-colheita. Conclui-se que os revestimentos nanoestruturados à base de quitosana e cera de abelha apresentam potencial para aplicação na conservação de lima ácida Tahiti, embora para este estudo, os revestimentos tenham apresentado efeitos pontuais na manutenção da qualidade pós-colheita, especialmente na preservação de pigmentos e redução parcial da perda de massa fresca, mas não tenham promovido controle significativo da podridão.

Palavras-chave: pós-colheita; revestimentos; quitosana; citros; nanotecnologia.

SUMMARY

Tahiti acid lime (*Citrus latifolia* Yu. Tanaka) is of considerable economic importance in Brazil. However, its postharvest quality is limited by physiological changes that compromise fruit appearance, shelf life, and market value. In this context, the present study aimed to develop and evaluate the effectiveness of nanostructured coatings based on chitosan and beeswax for the postharvest preservation of Tahiti acid limes. The experiment was conducted using a completely randomized design comprising five treatments: T0 (control, without coating application), T1 (coating containing beeswax nanoparticles), T2 (coating based on chitosan nanoparticles), T3 (coating containing a combination of chitosan nanoparticles and 5% beeswax nanoparticles), and T4 (coating containing a combination of chitosan nanoparticles and 10% beeswax nanoparticles). The fruits were stored for 11 days at 21 °C and evaluated at four storage periods (0, 4, 8, and 11 days), using three replicates of 10 fruits each. Physicochemical variables were evaluated, including fresh weight loss, soluble solids content, titratable acidity, ascorbic acid content, pigment content (chlorophylls and carotenoids), and the incidence of decay and oleocellosis. Among the nanostructured coatings, treatments T1 and T2 reduced fruit fresh weight loss throughout storage, indicating an effect on reducing water loss. No significant differences in the incidence of decay or oleocellosis were observed among the treatments. Regarding chemical quality, treatments T1 and T4 provided better maintenance of soluble solids content, whereas T2 and T4 showed the best results for juice yield. Treatment T1 was the most effective in preserving pigments, maintaining higher chlorophyll and carotenoid contents and thereby contributing to the retention of the fruits' green color. Therefore, T1 provided the best overall postharvest preservation.

In conclusion, nanostructured coatings based on chitosan and beeswax have potential for application in the postharvest preservation of Tahiti acid limes. Nevertheless, under the conditions of this study, the coatings produced specific effects on postharvest quality, particularly regarding pigment preservation and the partial reduction of fresh weight loss, but did not significantly control fruit decay.

Keywords: postharvest; coatings; chitosan; citrus; nanotechnology.

1. INTRODUÇÃO

A lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia* Yu. Tanaka) apresenta elevada relevância econômica para a fruticultura brasileira, tanto pelo abastecimento do mercado interno quanto por sua participação nas exportações de frutas frescas. Em 2023, o Brasil produziu aproximadamente 1,72 milhão de toneladas de limões e limas, sendo estimado que a lima ácida Tahiti represente cerca de 97% da produção nacional desse segmento (USDA, 2025). O estado de São Paulo destaca-se como o principal produtor, com aproximadamente 1,27 milhão de toneladas produzidas em 2024, correspondentes a 73,9% da produção nacional, em uma área colhida de 39,18 mil hectares e rendimento médio de 32,39 t ha⁻¹ (IBGE, 2025). No primeiro semestre de 2025, as exportações brasileiras de limões e limas alcançaram 106,7 mil toneladas, enquanto o estado de São Paulo exportou mais de 81 mil toneladas de lima ácida Tahiti, gerando aproximadamente US\$ 72 milhões e apresentando crescimento de 21% em relação ao mesmo período de 2024 (ABRAFRUTAS, 2025; São Paulo, 2025).

Após a colheita, os frutos permanecem metabolicamente ativos e sujeitos a alterações fisiológicas, bioquímicas e microbiológicas que podem comprometer sua aparência, composição e vida útil. Entre as estratégias utilizadas para reduzir essas alterações destacam-se a refrigeração, o acondicionamento em atmosfera modificada, as embalagens e os recobrimentos comestíveis. Esses recobrimentos formam uma camada semipermeável sobre a superfície dos frutos, limitando a perda de água e modulando as trocas gasosas, o que pode contribuir para retardar a respiração e a deterioração durante o armazenamento (Perez-Vazquez et al., 2023; Zdulski; Rutkowski; Konopacka, 2024).

Nesse contexto, a quitosana destaca-se como um biopolímero promissor para a elaboração de recobrimentos comestíveis, devido à sua capacidade de formação de filmes e às suas propriedades de barreira e atividade antimicrobiana. Estudos recentes avaliaram sua aplicação em diferentes frutos, incluindo morangos, em associação com gelatina e extrato da casca de romã (Bertolo et al., 2025); frutos cítricos, em recobrimentos multicamadas

com carboximetilcelulose (Niu et al., 2023); e tangerinas, em combinação com nanoemulsão de óleo essencial para proteção contra a deterioração fúngica (Maswanganye; Pillai; Sivakumar, 2025). Esses trabalhos demonstram a versatilidade da quitosana na conservação pós-colheita de frutos.

A nanotecnologia também tem possibilitado o desenvolvimento de recobrimentos com maior área superficial, melhor dispersão dos componentes e maior interação com a superfície dos frutos. A nanoestruturação da quitosana pode favorecer sua estabilidade, uniformidade e atividade funcional (Dai et al., 2025). A cera de abelha, por sua vez, apresenta caráter hidrofóbico e pode melhorar a barreira contra a transferência de umidade (Nunes et al., 2023). A associação entre nanoquitosana e cera de abelha reúne as propriedades de barreira dos materiais polissacarídicos e lipídicos, apresentando potencial para a conservação de frutos frescos (Kim et al., 2025). Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um recobrimento à base de nanopartículas de quitosana associadas às nanopartículas de cera de abelha para a conservação pós-colheita de frutos de lima ácida Tahiti.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Lima ácida Tahiti

A lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka) consolidou-se como uma das principais frutas cítricas cultivadas e comercializadas no Brasil, destinando-se tanto ao abastecimento do mercado interno quanto à exportação. Seus frutos destacam-se pela elevada acidez, pelo alto rendimento de suco e pela ausência ou baixa ocorrência de sementes, características que favorecem seu consumo in natura e sua utilização no preparo de sucos, bebidas e diferentes produtos da indústria alimentícia (PESAGRO-RIO, 2021). No mercado internacional, os países europeus constituem importantes destinos da fruta brasileira, com destaque para os Países Baixos, que atuam como uma das principais portas de entrada e redistribuição do produto no continente europeu, além do Reino Unido, que também apresenta participação relevante nas importações (USDA, 2025).

Botanicamente, a limeira ácida Tahiti pertence à família Rutaceae e ao gênero *Citrus*. Trata-se de uma planta perene, de porte médio a grande, vigorosa, com copa arredondada e folhagem densa e persistente, de coloração verde intensa. A planta apresenta flores brancas e aromáticas, que podem ocorrer isoladamente ou agrupadas nas axilas das folhas. Por sua natureza triploide e pela baixa viabilidade do pólen e dos óvulos, os frutos são geralmente desprovidos de sementes, característica valorizada pelos consumidores e pelo mercado de frutas frescas. O fruto é classificado botanicamente como hesperídio e apresenta casca fina, lisa e rica em glândulas produtoras de óleos essenciais, além de polpa suculenta, dividida em segmentos e com elevada concentração de ácidos orgânicos, especialmente o ácido cítrico (Bastos et al., 2022; Barros; Celestino, 2024).

A floração da limeira ácida Tahiti pode ocorrer em diferentes períodos do ano, especialmente quando há condições adequadas de temperatura e disponibilidade hídrica, possibilitando a produção de frutos durante praticamente todo o ano. O período entre a floração e a maturação pode variar de aproximadamente 120 a 170 dias, dependendo das condições edafoclimáticas e das práticas de manejo, sendo que a maior concentração da produção geralmente ocorre no primeiro semestre. Os frutos apresentam formato oval,

oblongo ou levemente elíptico, casca fina e coloração verde intensa durante o período comercial, tornando-se verde-clara ou amarelada com o avanço da maturação. Geralmente, apresentam massa entre 70 e 100 g, embora essas características possam variar de acordo com a cultivar, o porta-enxerto, o manejo e as condições ambientais (Embrapa, 2023; Habibi et al., 2023; Huynh et al., 2024)

Além da possibilidade de produção ao longo do ano, a cultura apresenta relativa precocidade, uma vez que plantas adequadamente manejadas podem iniciar uma produção comercial significativa a partir do terceiro ano após o plantio. Entretanto, o desempenho produtivo do pomar depende de diferentes fatores, entre os quais se destaca a combinação entre a cultivar-copa e o porta-enxerto utilizado (Barros; Celestino, 2024). Na citricultura, o porta-enxerto exerce influência direta sobre o porte e o vigor da planta, a precocidade, a produtividade, a qualidade dos frutos e a adaptação às condições edafoclimáticas. Sua escolha também pode proporcionar maior tolerância a condições adversas, como seca e salinidade, além de interferir na resistência ou suscetibilidade das plantas a determinadas doenças (Barros; Celestino, 2024).

Nesse contexto, a obtenção de frutos com elevada qualidade comercial exige um sistema de produção tecnificado e um manejo adequado em todas as etapas, desde a escolha das mudas e a implantação do pomar até os tratamentos culturais, a colheita e as operações de pós-colheita. A colheita deve ser realizada cuidadosamente, evitando danos mecânicos, rompimento das glândulas de óleo da casca e outros ferimentos capazes de comprometer a aparência, favorecer a perda de água e aumentar a suscetibilidade dos frutos à deterioração (PESAGRO-RIO, 2021).

Após a colheita, a classificação constitui uma etapa importante para a padronização dos lotes e para o atendimento às exigências dos diferentes mercados. A comercialização da lima ácida Tahiti considera características como tamanho, formato, coloração da casca, ausência de defeitos e estado de conservação. De acordo com os padrões adotados pela Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo, os frutos podem ser classificados em função do diâmetro transversal, geralmente compreendido entre 35 e 60 mm.

Frutos com maior diâmetro e boa aparência apresentam maior potencial para atender aos mercados mais exigentes, enquanto, no mercado nacional, são comuns frutos com diâmetro entre 50 e 55 mm (CEAGESP, 2023). Dessa forma, a conservação das características físicas, químicas e visuais após a colheita é fundamental para prolongar a vida útil, reduzir perdas e preservar o valor comercial da lima ácida Tahiti.

E por fim, a sazonalidade exerce forte influência sobre a oferta e, conseqüentemente, sobre os preços: de dezembro a fevereiro observa-se maior disponibilidade, alta safra e preços mais baixos, enquanto entre setembro e novembro ocorre menor oferta, resultando em valores mais elevados. Tal dinâmica evidencia a relevância da lima ácida Tahiti, cuja presença no mercado se mantém ao longo de todo o ano (CEAGESP, 2023).

Entre os frutos cítricos, a lima ácida Tahiti apresenta uma particularidade comercial importante, uma vez que seus frutos são mais valorizados quando mantêm a coloração verde da casca. Com o avanço da maturação e da senescência, ocorre a degradação da clorofila presente no flavedo, tornando mais evidentes os pigmentos carotenoides e promovendo a mudança gradual da coloração verde para tonalidades verde-amareladas ou amarelas. Embora essa alteração não represente necessariamente perda imediata da qualidade interna, ela reduz a aceitação do fruto pelos consumidores e, conseqüentemente, seu valor comercial (Habibi et al., 2023; Huynh et al., 2024).

A perda da coloração verde pode ser acelerada por condições inadequadas de armazenamento, como temperaturas elevadas, baixa umidade relativa e exposição prolongada ao etileno. Esses fatores intensificam o metabolismo e os processos de senescência dos frutos, favorecendo a degradação da clorofila, a perda de água e a redução da qualidade visual durante o período pós-colheita (Huynh et al., 2024).

Diante dessas alterações, os recobrimentos comestíveis apresentam-se como uma alternativa para preservar a qualidade pós-colheita da lima ácida Tahiti. Quando aplicados sobre a superfície dos frutos, esses materiais formam uma camada fina e semipermeável, capaz de reduzir a perda de água e modificar parcialmente as trocas gasosas entre o fruto e o ambiente (Moradinezhad et al.,

2025; Perez-Vazquez et al., 2023). Como consequência, podem diminuir a intensidade respiratória e retardar processos relacionados à maturação e à senescência, contribuindo para a manutenção da firmeza, da coloração da casca e de outros atributos de qualidade. Em frutos de lima, recobrimentos comestíveis também demonstraram potencial para reduzir a perda de massa e retardar a perda da coloração verde durante o armazenamento (Mohammadi; Rastegar; Rohani, 2024). Além disso, dependendo dos materiais e dos compostos ativos utilizados em sua formulação, os recobrimentos podem apresentar propriedades antioxidantes e antimicrobianas, ampliando seu potencial de aplicação na conservação de frutas (Moradinezhad et al., 2025; Perez-Vazquez et al., 2023).

2.2 Recobrimentos na conservação pós-colheita de frutos

Nos últimos anos, os recobrimentos comestíveis têm se destacado como uma alternativa sustentável para a conservação pós-colheita de frutos, especialmente por contribuírem para a redução de perdas, a manutenção da qualidade e o prolongamento da vida útil. Esses materiais são elaborados, em geral, a partir de compostos seguros para o consumo humano, incluindo polissacarídeos, como pectina, alginato e quitosana; proteínas, como gelatina, caseína e proteína do soro do leite; e lipídios, como ácidos graxos e ceras naturais. Quando aplicados sobre a superfície dos frutos, formam uma camada fina e semipermeável, capaz de reduzir a perda de água, modular as trocas gasosas e retardar processos fisiológicos associados à respiração, maturação e senescência (Alemu; Intipunya; Gebeyo, 2025; Moradinezhad et al., 2025; Perez-Vazquez et al., 2023).

Além da função de barreira, os recobrimentos comestíveis podem atuar como sistemas ativos de conservação quando incorporados a compostos bioativos, como óleos essenciais, extratos vegetais, antioxidantes, antimicrobianos ou nanopartículas. Esses componentes podem ampliar a proteção contra a deterioração microbiana e oxidativa, contribuindo para preservar características físico-químicas, nutricionais e sensoriais dos frutos durante o armazenamento. Em peras frescas cortadas, por exemplo, recobrimentos à base de proteína do soro do leite associados a óleos essenciais

de limão e capim-limão contribuíram para a redução das alterações de cor, da perda de firmeza e da degradação de compostos fenólicos e flavonoides durante o armazenamento refrigerado (Galus et al., 2021).

Entre os materiais utilizados na formulação de recobrimentos, a quitosana apresenta destaque por sua capacidade de formar filmes, além de suas propriedades de barreira e atividade antimicrobiana. Em frutos cítricos, Niu et al. (2023) avaliaram um recobrimento em camada dupla à base de quitosana e carboximetilcelulose e observaram que a aplicação contribuiu para reduzir a perda de massa e manter atributos de qualidade, como firmeza, acidez titulável e teor de ácido ascórbico. Esses resultados reforçam o potencial da quitosana como matriz para recobrimentos destinados à conservação pós-colheita de frutos.

2.3 Quitosana na formulação de recobrimentos

A quitosana é um polímero derivado da quitina, constituído principalmente por unidades de D-glicosamina e N-acetil-D-glicosamina unidas por ligações β -(1 $\rightarrow$ 4). Esse biopolímero apresenta elevada capacidade de formação de filmes, baixa toxicidade, biodegradabilidade e propriedades antimicrobianas, características que favorecem sua aplicação em recobrimentos comestíveis para conservação pós-colheita de frutos. Quando aplicada sobre a superfície dos frutos, a quitosana forma uma película semipermeável capaz de reduzir a perda de água, modular as trocas gasosas, diminuir a taxa respiratória e contribuir para a manutenção da firmeza, da coloração e de outros atributos de qualidade durante o armazenamento (Dai et al., 2025).

Além da atuação como barreira física, a quitosana pode exercer efeito antimicrobiano por meio de interações entre seus grupos amino carregados positivamente e os componentes de carga negativa presentes na superfície das células microbianas, comprometendo a integridade celular e o desenvolvimento de microrganismos. Em uvas, Eshghi et al. (2022) observaram que recobrimentos à base de quitosana e goma ghatti contribuíram para a manutenção de compostos fenólicos, atividade antioxidante e qualidade pós-colheita durante o armazenamento. Em frutos cítricos, Maswanganye, Pillai e

Sivakumar (2025) avaliaram um recobrimento de quitosana associado à nanoemulsão de óleo essencial de hortelã-verde e verificaram proteção contra *Penicillium digitatum* e *Penicillium italicum*, reforçando o potencial da quitosana como matriz para recobrimentos destinados à conservação de frutos.

2.4 Cera de abelha na formulação de recobrimentos

A cera de abelha é um material natural produzido por abelhas e utilizado na construção dos favos, sendo constituída por uma mistura complexa de compostos lipídicos. Sua composição pode variar de acordo com a origem botânica, geográfica, idade da cera e condições de processamento, mas é formada principalmente por ésteres de cera, hidrocarbonetos, ácidos graxos livres e outros compostos hidrofóbicos. Essas características conferem à cera de abelha estabilidade físico-química, termoplasticidade e capacidade de formar barreiras contra a transferência de umidade (Huanbutta et al., 2026).

Em recobrimentos comestíveis, a cera de abelha destaca-se pelo caráter hidrofóbico, que contribui para reduzir a permeabilidade ao vapor de água e minimizar a desidratação dos frutos durante o armazenamento. Quando aplicada como componente de revestimentos, pode formar uma camada protetora sobre a superfície dos frutos, auxiliando na preservação do frescor, na redução da perda de umidade, da oxidação e da contaminação microbiana. Dessa forma, seu uso tem sido associado à manutenção da qualidade e ao prolongamento da vida útil de frutas e hortaliças (Maicelo-Quintana et al., 2024).

Apesar dessas vantagens, materiais lipídicos isolados podem apresentar limitações relacionadas à aderência, uniformidade e propriedades mecânicas do filme formado. Por isso, a cera de abelha é frequentemente associada a biopolímeros, como polissacarídeos e proteínas, buscando combinar a barreira à umidade dos lipídios com a capacidade de formação de filmes dos polímeros. Em peras, Sultan et al. (2021) observaram que filmes à base de quitosana e cera de abelha, associados a grãos de pólen, reduziram a taxa de transmissão de vapor de água e contribuíram para diminuir a perda de massa, a deterioração e o amolecimento dos frutos durante o armazenamento. Mais recentemente, Kim et al. (2025) desenvolveram um sistema de emulsão Pickering com

nanoquitosana, alginato e cera de abelha para recobrimento comestível, reforçando o potencial da associação entre matrizes polissacarídicas e lipídicas na conservação pós-colheita de frutos.

2.5 Nanotecnologia na formulação de recobrimentos para aplicação em frutos.

As nanoemulsões têm se destacado como sistemas promissores para aplicação em recobrimentos comestíveis, principalmente por permitirem a incorporação e a liberação de compostos bioativos, como antioxidantes e agentes antimicrobianos. Esses sistemas são constituídos, em geral, por gotículas de óleo dispersas em fase aquosa e estabilizadas por emulsificantes, apresentando tamanho reduzido, elevada área superficial e maior estabilidade físico-química. Em razão dessas características, as nanoemulsões podem favorecer melhor distribuição dos compostos ativos e cobertura mais uniforme sobre a superfície dos frutos, contribuindo para a conservação pós-colheita (Mushtaq et al., 2023; Oliveira Filho et al., 2021).

Quando utilizadas como recobrimentos, as nanoemulsões formam uma camada fina sobre a superfície dos frutos, podendo ser aplicadas por imersão, pulverização ou pincelamento. Essa camada atua como barreira parcial entre o fruto e o ambiente, reduzindo a perda de água, a troca gasosa e a contaminação microbiana, além de retardar processos associados à respiração, maturação, senescência e deterioração oxidativa. Dessa forma, esses sistemas podem contribuir para a manutenção do frescor, da firmeza, da coloração e de outros atributos de qualidade durante o armazenamento (Oliveira Filho et al., 2021; Sharma et al., 2024).

A estabilidade das nanoemulsões está relacionada ao tamanho médio das gotículas, à distribuição de tamanho e à carga superficial, parâmetros que influenciam a tendência à agregação, separação de fases, sedimentação e formação de creme. Por isso, a caracterização desses sistemas costuma envolver análises como observação visual da estabilidade, determinação do tamanho médio das partículas, índice de polidispersão e potencial zeta, além de avaliações complementares de pH, condutividade e turbidez. Essas análises

permitem verificar a uniformidade, a estabilidade e o potencial de aplicação das formulações como recobrimentos em alimentos (Mushtaq et al., 2023).

Além das nanoemulsões lipídicas, a nanoestruturação da quitosana também tem sido investigada como estratégia para melhorar a eficiência de recobrimentos pós-colheita. Em framboesas **Ishkeh-Sardroodi et al. (2021)** observaram que a aplicação de nanoemulsão de quitosana contribuiu para prolongar a vida útil e preservar compostos fitoquímicos durante o armazenamento. Em flores de corte de gérbera, Spricigo et al. (2021) verificaram que a nanoquitosana favoreceu a absorção relativa de água, manteve o balanço hídrico e reduziu o crescimento microbiano. Esses resultados reforçam o potencial da nanotecnologia na elaboração de recobrimentos e soluções pós-colheita mais eficientes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material Vegetal

Para a realização do experimento foram utilizadas limas ácidas Tahiti, colhidas em pomar comercial no município de Taquaritinga, SP, latitude de 21° 24' 21" S e longitude de 48° 30' 18" O, de acordo com os padrões mínimos de qualidade, quanto à uniformidade em relação ao tamanho e coloração e ausência de sintomas de doenças (Figura 1).



Figura 1 - Limas ácidas Tahiti higienizadas

Posteriormente à colheita, os frutos foram levados para o Laboratório de Inovação Pós-colheita (LIPC) da FCAV-UNESP em Jaboticabal, onde foram lavados com detergente neutro, enxaguados em água corrente e higienizados, imergindo-os em solução de Sumaveg® a 200 mg L⁻¹ de cloro livre, por 5 minutos. Depois de secos ao ambiente, foram selecionados e separados em lotes, correspondentes aos tratamentos (Figura 2).



Figura 2: Esquema da higienização e aplicação dos recobrimentos.

3.2 Preparo dos Recobrimentos

3.2.1 Nanopartícula de quitosana

Para o preparo dos recobrimentos, nanopartículas de quitosana foram obtidas pelo procedimento de gelificação ionotrópica ou iônica, onde inicialmente os géis de quitosana a 3 mg mL^{-1} foram preparados por solubilização em ácido fraco, ácido cítrico a 2%, sob agitação intensa e aquecimento a 40°C , como descrito por Moura et al., (2008) e adaptado por Spricigo et al., (2021).

Em seguida foi adicionado o agente reticulante polianiônico tripolifosfato pentasódico (TPP) a $2,1 \text{ mg mL}^{-1}$, por gotejamento contínuo a uma taxa de 1 mL min^{-1} e agitação constante a 4.000 rpm (Ultra-Turrax), em uma proporção de TPP: quitosana de 1:2,5 (Nano quitosana/TPP), de acordo com o procedimento descrito por Barros-Alexandrino, 2020.

3.2.2 Nanopartículas de cera de abelha

A nanopartícula de cera de abelha (Nano CA) foi obtida a partir do método descrito por Zaragoza et al., (2013), onde 100 g L^{-1} de cera de abelha (CA) foram derretidas a 75°C , para formar a fase oleosa e separadamente, água destilada foi aquecida a 75°C . Adicionou-se o álcool polivinílico (estabilizador) a 50 g L^{-1}

para formar a fase aquosa. A fase oleosa foi dispersada na fase aquosa sob alto cisalhamento de agitação (Ultra-Turrax) por 10 min, por 3 ciclos com 5 minutos de repouso entre os ciclos. A nanopartícula de cera de abelha foi obtida pelo resfriamento à temperatura ambiente para permitir a sua formação.

3.2.3 Formulações base do recobrimento contendo nanopartículas de cera de abelha

Para a obtenção da formulação base do recobrimento misturou-se 0,4 g L⁻¹ de goma xantana (G), 5 g L⁻¹ de propileno glicol (P) e 30 g L⁻¹ da nanopartícula de cera de abelha (Nano CA), completando-se o volume final com água destilada, em agitação sob aquecimento (Barros-Alexandrino, 2020).

3.2.4 Recobrimentos à base de nanopartículas de quitosana e cera de abelha

Para o preparo do recobrimento contendo nanopartículas de quitosana e de cera de abelha foram testadas as proporções de 5% e 10% da formulação base do recobrimento contendo nano cera de abelha (G + P+ Nano CA), adicionando-se 10% da solução de nano quitosana (Nano quitosana/TPP) em ambas as formulações, 5 g/L de propileno glicol (P), completando o restante com água destilada, em agitação sob aquecimento.

3.3. Caracterização da nanopartícula de quitosana e da nanopartícula de cera de abelha.

A caracterização das dispersões formadoras dos recobrimentos foi realizada em parceria com a Embrapa Instrumentação, no Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA), localizado em São Carlos (SP). Foram avaliados a distribuição do tamanho de partículas, o índice de polidispersão (PDI) e o potencial zeta das suspensões, previamente diluídas em água deionizada na proporção 1:100, em temperatura ambiente, utilizando-se o equipamento Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Inc., Westborough, MA, EUA).

Ressalta-se que, no presente estudo, a caracterização foi direcionada às propriedades físico-químicas das dispersões nanoparticuladas, como tamanho de partículas, índice de polidispersão e potencial zeta. Avaliações complementares relacionadas à permeabilidade ao vapor de água, permeabilidade a gases, espessura, propriedades mecânicas e estabilidade dos filmes formados poderão ser realizadas em estudos futuros, a fim de ampliar a compreensão sobre o desempenho dos recobrimentos aplicados aos frutos.

3.4 Instalação do experimento

Para a instalação do experimento os frutos foram divididos em lotes correspondentes aos cinco tratamentos:

- T0= controle, imersão dos frutos em água destilada, por 1 minuto;
- T1= Nano cera de abelha (Nano CA), aplicada manualmente no fruto por 1 minuto;
- T2= Solução contendo 10% de Nano quitosana/TPP + 0,4 g/L de G + 5 g/L de P e imersão dos frutos por 1 minuto. (Controle da cobertura - sem Nano CA).
- T3= 5% da formulação base do recobrimento contendo nano cera de abelha (G + P + Nano CA) + 10% de Nano quitosana/TPP e imersão dos frutos por 1 minuto;
- T4= 10% da formulação base do recobrimento contendo nano cera de abelha (G + P + Nano CA) + 10% de Nano quitosana/TPP e imersão dos frutos por 1 minuto.

Após a aplicação dos tratamentos, os frutos foram dispostos em esportes, à temperatura de ambiente ($22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), até a secagem completa do recobrimento. Na sequência foram armazenadas a $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 85% UR, por um período de 11 dias para as avaliações dos atributos de qualidade. O experimento foi conduzido em delineamento experimental inteiramente

casualizado, composto por cinco tratamentos e quatro datas de avaliação (0; 4; 8 e 11 dias). Foram utilizadas 3 repetições com 10 frutos cada.

3.4.1 Análises de qualidade dos frutos

Para a análise da qualidade pós-colheita dos frutos foram avaliados os seguintes parâmetros:

- **Massa fresca:** a evolução da perda de massa fresca diária (PMFD) foi quantificada em balança com precisão de 0,01 g, expressa em porcentagem, considerando-se a diferença entre o peso inicial do fruto e aquele obtido a cada intervalo de tempo de amostragem. A perda de massa fresca foi determinada pela diferença entre a massa inicial e a massa obtida em cada período de avaliação, conforme a equação: $PMF = M_i - M_f$. A perda de massa fresca acumulada foi expressa em porcentagem, utilizando-se a equação: $PMFA (\%) = [(M_i - M_f) / M_i] \times 100$, em que M_i corresponde à massa inicial do fruto e M_f à massa do fruto no momento da avaliação.
- **Coloração da casca:** a coloração da casca foi realizada a partir de um critério visual de notas pré-estabelecidas, a partir de uma escala de cor de 1 a 5, sendo 1= verde escuro, 2= verde oliva, 3= verde claro, 4= verde amarelado e 5= amarelo (Figura 3), de acordo com Acioly (2018), sendo os resultados expressos em porcentagem de frutos para cada nota.



Figura 3 - Progressão da coloração (Fonte: Acioly, 2018).

- **Rendimento de suco:** determinado pela diferença entre a massa dos frutos inteiros (g) e a massa do suco (g), e os resultados expressos em porcentagem de suco.
- **Concentração de clorofilas na casca:** a concentração de clorofilas na casca das frutas foi determinada de acordo com os métodos descritos por Lichtenthaler e Wellburn (1983).
- LICHTENTHALER, H.; WELLBURN, A. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochemical Society Transactions. 1983, n.603, p.591-592.
- **Teor de acidez titulável:** a acidez titulável foi quantificada utilizando-se a metodologia descrita pela AOAC (1997), expressa em mg de ácido cítrico por 100 g de polpa.
- **Teor de sólidos solúveis:** determinado segundo AOAC (1997), utilizando refratômetro digital modelo PR 101, e os resultados expressos em ° Brix.
- **Ácido ascórbico:** o teor de ácido ascórbico (AA) foi quantificado pelo método de redução do indicador 2,6- diclofenol indofenol-sódio (DCFI) pelo ácido ascórbico, e os resultados expressos em mg 100 g⁻¹ de suco.

- **Incidência de doença:** a incidência de doença foi avaliada pela presença de podridão em relação ao número de frutos totais, e expressos em porcentagem de frutos com sintomas de podridão.

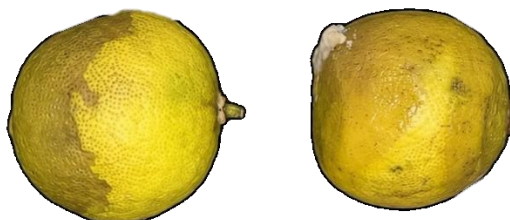


Figura 4 – incidência de doenças nas limas ácida Tahiti

- **Oleocelose:** a presença de oleocelose nos frutos foi determinada pela contagem de frutos com a presença do dano (Figura 4), sendo os resultados expressos em porcentagem de frutos com Oleocelose.

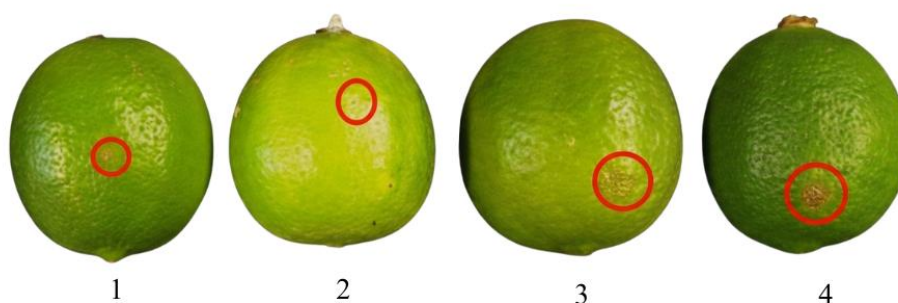


Figura 5 - Oleocelose nos frutos (Fonte: Acioly, 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização da nanopartícula de quitosana e da nanopartícula de cera de abelha

Os resultados preliminares da caracterização das dispersões nanoparticuladas indicaram tamanho médio de partículas de 110,4 nm para as nanopartículas de quitosana (Figura 6) e de 173,5 nm para as nanopartículas de

cera de abelha, com 90,9% das partículas nessa faixa de distribuição (Figura 7). Entretanto, também foi observada a presença de aglomerados de nanopartículas, possivelmente associados à agregação parcial das partículas durante o processo de preparo ou dispersão das amostras. Esse comportamento indica a necessidade de otimização das condições de formulação, como concentração dos componentes, tempo e velocidade de homogeneização, temperatura, uso de agentes estabilizantes e, no caso da quitosana, controle da taxa de adição do TPP, visando obter suspensões mais uniformes e estáveis.

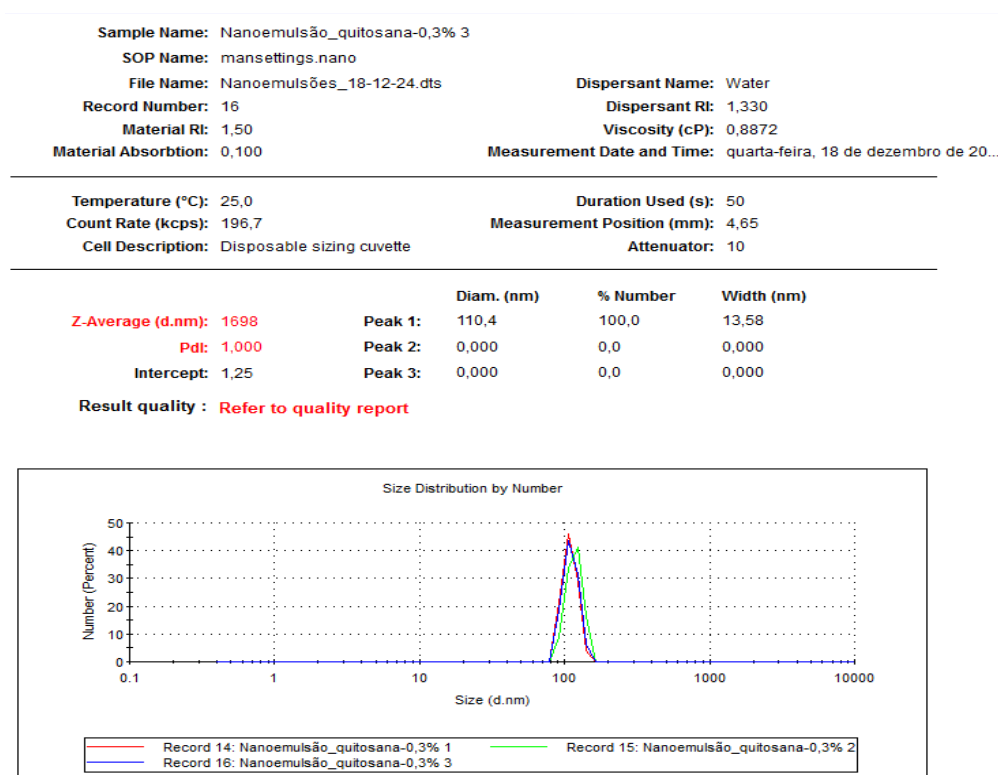


Figura 6 - Tamanho (nm) e dispersão das partículas na amostra de nano quitosana.

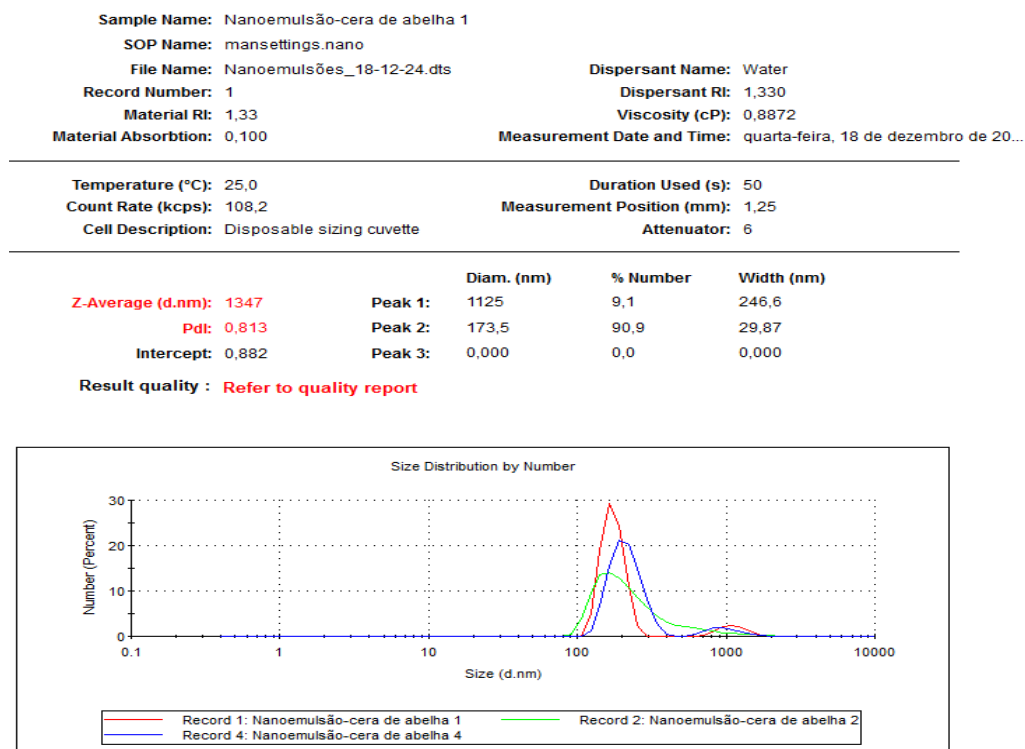


Figura 7 - Tamanhos (nm) e dispersão das partículas na amostra de nano cera de abelha.

Em geral, espera-se que no processo de formulação de recobrimentos seja gerado partículas de dimensões menores quanto possíveis, bem como uma estreita distribuição de tamanhos para garantir maior área superficial e maior homogeneidade afim de favorecer as reações químicas de interação entre os componentes do recobrimento com o produto de interesse (Sorrentino; Gorrasi; Vittoria, 2007)

Parâmetros como o pH do meio, a proporção entre a quitosana e o agente reticulante TPP, o índice de agregação e o grau de desacetilação da quitosana utilizada (Cunha et al. 2017; Sawtarie et al., 2017) influenciam no tamanho final das nanopartículas de quitosana obtidas pelo método de gelificação iônica. Barros-Alexandrino et al., (2020) concluíram que fatores como a altura de gotejamento do TPP com relação a superfície líquida do gel de quitosana e a velocidade de agitação do meio são determinantes para a formação de partículas diminutas.

As amostras de nano quitosana apresentaram índice de poli dispersão (PDI) de 1 e as amostras a partir da nano cera de abelha obtiveram um índice de 0,813 (figuras 8 e 9). Esses resultados revelam a necessidade de reduzir o PDI para obtenção de melhor distribuição de partículas, uma vez que a redução da poli dispersividade indica maior homogeneidade do tamanho das partículas (Barros-Alexandrino et al., 2020).

Em relação ao potencial zeta das dispersões nanoparticuladas, a nanoquitosana apresentou valor de +25,6 mV (Figura 7), enquanto a nano cera de abelha apresentou valor de -18,7 mV (Figura 8). Esses resultados indicam diferenças na carga superficial das formulações avaliadas, positiva para a nanoquitosana e negativa para a nano cera de abelha. No entanto, esses valores não devem ser interpretados como indicativo de melhor ou pior desempenho entre os recobrimentos, pois correspondem aos resultados iniciais das formulações. De modo geral, valores de potencial zeta mais afastados de zero estão associados à maior estabilidade físico-química das suspensões coloidais e à menor tendência de formação de aglomerados (Schaffazick et al., 2003).

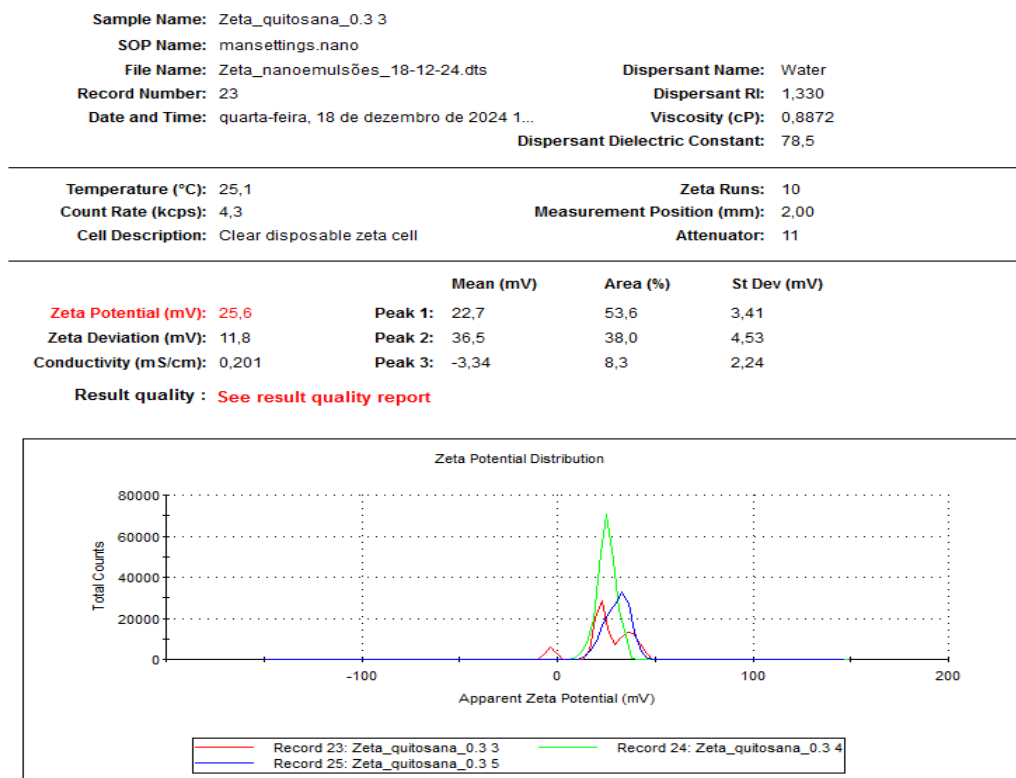


Figura 8 - Valor de potencial Zeta (mV) das partículas na amostra de nano quitosana.

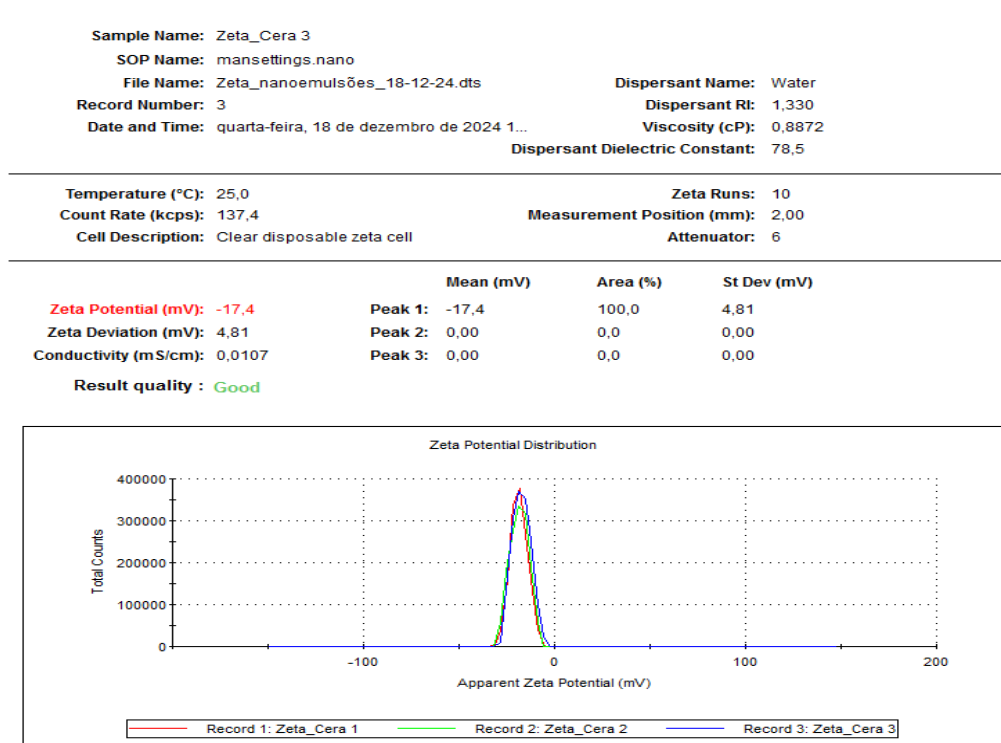


Figura 9 - Valor de potencial Zeta (mV) das partículas na amostra de nano cera de abelha

4.2 Análises de qualidade dos frutos

A perda de massa fresca diária (PMFD) aumentou progressivamente ao longo do armazenamento, passando de 0,00% no início do experimento para 1,69% aos 4 dias, 2,15% aos 8 dias e 3,38% aos 11 dias (Tabela 1). Considerando o efeito médio dos tratamentos, não foram observadas diferenças significativas entre o controle e os recobrimentos nanoestruturados, cujas médias variaram de 1,75% a 1,78%. Entretanto, a interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa, indicando que o comportamento da PMFD variou em função da combinação entre esses dois fatores e deve ser interpretado por meio do desdobramento da interação.

Quanto à perda de massa fresca acumulada (PMFA), observou-se aumento contínuo durante o período experimental, com valores de 1,69% aos 4 dias, 5,08% aos 8 dias e 7,23% aos 11 dias (Tabela 1). Entre os tratamentos, os

frutos do controle (T0) apresentaram a maior média de perda acumulada, com 3,75%, diferindo dos tratamentos T1 e T2, que apresentaram 3,38% e 3,40%, respectivamente. Os tratamentos T3 e T4 apresentaram valor intermediário de 3,48%, não diferindo estatisticamente do controle nem de T1 e T2. Como não houve interação significativa para a PMFA, esses resultados demonstram que T1 e T2 foram os tratamentos que mais contribuíram para a redução da perda de massa fresca acumulada.

Tabela 1. Perda de massa fresca diária (PMFD), perda de massa fresca acumulada (PMFA), oleocelose, podridão, rendimento, sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT) e ácido ascórbico (AA) em frutos de lima ácida Tahiti submetidos a diferentes revestimentos nanoestruturados e armazenados por 0, 4, 8 e 11 dias. T0: controle; T1: Nano CA; T2: nano quitosana/TPP + G + P, sem Nano CA; T3: 5% da formulação base com Nano CA + nano quitosana/TPP; T4: 10% da formulação base com Nano CA + nano quitosana/TPP.

Fatores	Parâmetros							
	PMFD	PMFA	Oleocelose	Podridão	Rendimento	SS	AT	AA
Dias (A)	%	%	%	%	%	°Brix	mg.g ⁻¹	mg.g ⁻¹
0	0,00 d	0,00 d	33,33 a	0,70 b	43,87 b	8,20 a	3,97 a	30,86 a
4	1,69 c	1,69 c	44,66 a	4,19 a	39,17 c	7,15 b	3,07 b	23,00 bc
8	2,15 b	5,08 b	38,66 a	2,84 a	47,55 a	6,63 b	3,12 b	21,63 c
11	3,38 a	7,23 a	38,66 a	4,07 a	48,95 a	6,41 b	2,97 b	23,82 b
Tratamento (B)								
T0	1,78 a	3,75 a	42,50 a	2,95 a	42,53 b	7,37 ab	4,02 a	25,89 b
T1	1,75 a	3,38 b	37,50 a	2,99 a	44,33 ab	8,19 a	3,48 b	22,98 c
T2	1,77 a	3,40 b	42,50 a	2,84 a	45,48 a	6,49 bc	3,38 b	23,49 c
T3	1,78 a	3,48 ab	35,83 a	2,96 a	45,31 ab	5,59 c	2,43 c	23,83 c
T4	1,78 a	3,48 ab	35,83 a	3,01 a	46,76 a	7,83 a	3,09 b	27,94 a
AxB	2,15*	NS	NS	NS	2,31*	4,37**	7,17**	11,81**
C.V. (%)	9,77	7,51	40,3	47,94	5,57	13,4	12,68	5,89

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para cada fator (Dias ou Tratamentos), não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). AxB: interação entre dias e tratamentos; NS: não significativo; * e **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente; CV: coeficiente de variação.

Os resultados observados estão relacionados ao comportamento fisiológico esperado para frutos cítricos durante o armazenamento pós-colheita. De modo geral, os citros são classificados como frutos não climatéricos, pois não apresentam pico respiratório e aumento acentuado da produção de etileno associados ao amadurecimento após a colheita (Navarro-Calderón et al., 2024). Entretanto, os frutos permanecem metabolicamente ativos após serem colhidos, mantendo processos como respiração celular e transpiração, que contribuem para alterações físicas e fisiológicas ao longo do armazenamento (Strano et al., 2022).

A perda de massa fresca está relacionada principalmente à perda de água por transpiração, processo que ocorre continuamente durante o armazenamento pós-colheita. Em citros, a perda excessiva de água pode comprometer processos fisiológicos e metabólicos, resultando em redução da firmeza, do brilho, da textura e da qualidade comercial dos frutos (Lin et al., 2024). Além disso, a respiração celular promove o consumo de substratos metabólicos, como açúcares e ácidos orgânicos, contribuindo para a manutenção do metabolismo, mas também para o avanço da senescência dos frutos (Strano et al., 2022).

Quanto à oleocelose, não foram observadas diferenças significativas entre os períodos de armazenamento nem entre os tratamentos, conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 1). Os valores médios foram de 33,33% no dia 0, 44,66% aos 4 dias e 38,66% aos 8 e 11 dias. Entre os tratamentos, as médias oscilaram de 35,83%, nos tratamentos T3 e T4, a 42,50%, nos tratamentos T0 e T2, sem diferença estatística significativa. A interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos também não foi significativa.

A oleocelose é uma desordem fisiológica da casca dos frutos cítricos associada ao rompimento das glândulas de óleo presentes no flavedo e à consequente liberação de óleos essenciais, que podem exercer efeito fitotóxico sobre as células da casca. Esse distúrbio pode ocorrer em decorrência de danos mecânicos e condições inadequadas de manuseio durante a colheita, o transporte e o beneficiamento dos frutos (Habibi et al., 2025; Strano et al., 2022).

Dessa forma, a ausência de efeito dos recobrimentos sobre a incidência de oleocelose pode ser explicada pela natureza desse distúrbio, que está mais relacionada à integridade física da casca e ao manuseio dos frutos do que aos processos metabólicos internos ocorridos durante o armazenamento. Nas condições avaliadas, os recobrimentos nanoestruturados não foram suficientes para reduzir sua incidência.

Os dados de podridão demonstraram que a variável foi influenciada significativamente pelo período de armazenamento, mas não pelos tratamentos com recobrimentos nanoestruturados. No início do experimento, os frutos apresentaram média de 0,70% de podridão. Esse valor aumentou para 4,19% aos 4 dias, permanecendo estatisticamente semelhante aos valores observados aos 8 dias, de 2,84%, e aos 11 dias, de 4,07% (Tabela 1).

Entre os tratamentos, os valores médios de podridão variaram de 2,84%, no tratamento T2, a 3,01%, no tratamento T4, sem diferença estatística significativa. A interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos também não foi significativa, demonstrando que o comportamento da podridão ocorreu de forma semelhante em todos os tratamentos, inclusive no controle. Portanto, o período de armazenamento foi o principal fator associado à variação na incidência de podridão.

Resultados distintos foram relatados por Dai et al. (2025), que observaram efeito antimicrobiano e redução da incidência de podridões em diferentes frutos tratados com recobrimentos à base de quitosana e seus derivados. De modo semelhante, Chavan et al. (2023) destacaram que recobrimentos comestíveis podem atuar como barreira física e incorporar agentes antimicrobianos, contribuindo para o prolongamento da vida útil pós-colheita. Em citros, Maswanganye, Pillai e Sivakumar (2025) relataram o potencial de recobrimentos à base de quitosana associados à nanoemulsão de óleo essencial de hortelã-verde no controle de *Penicillium digitatum* e *Penicillium italicum*. No presente estudo, entretanto, esse efeito não foi observado, sugerindo que a composição ou a concentração dos recobrimentos utilizados não foi suficiente para conferir proteção antimicrobiana efetiva aos frutos.

O rendimento de suco apresentou variação significativa em função dos períodos de armazenamento e dos tratamentos. No dia 0, o rendimento médio foi de 43,87%, diminuindo para 39,17% aos 4 dias. Posteriormente, ocorreu aumento para 47,55% aos 8 dias e 48,95% aos 11 dias (Tabela 1).

Considerando as médias gerais dos tratamentos, T2 e T4 apresentaram os maiores valores de rendimento de suco, com 45,48% e 46,76%, respectivamente, diferindo do tratamento controle T0, que apresentou a menor média, de 42,53%. Os tratamentos T1 e T3 apresentaram valores intermediários, com 44,33% e 45,31%, respectivamente, não diferindo estatisticamente do controle nem de T2 e T4.

Entretanto, como a interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa, o efeito dos recobrimentos sobre o rendimento de suco variou conforme o período de avaliação. Dessa forma, as médias gerais dos tratamentos devem ser interpretadas em conjunto com o desdobramento da interação, evitando-se afirmar que T2 e T4 foram superiores durante todo o armazenamento.

A variação no rendimento pode estar relacionada às modificações ocorridas nos tecidos dos frutos durante o armazenamento, incluindo alterações na distribuição de água, na estrutura dos tecidos e na capacidade de extração do suco. Os recobrimentos pós-colheita podem atuar como barreiras semipermeáveis às trocas gasosas e à perda de água, contribuindo para a manutenção da integridade dos tecidos e do conteúdo hídrico dos frutos. Entretanto, esse efeito depende da composição do recobrimento, da sua permeabilidade e da interação com a superfície do fruto (Perez-Vazquez et al., 2023).

Os sólidos solúveis apresentaram redução significativa durante o armazenamento, passando de 8,20 °Brix no dia 0 para 7,15 °Brix aos 4 dias, 6,63 °Brix aos 8 dias e 6,41 °Brix aos 11 dias (Tabela 1). Os valores observados aos 4, 8 e 11 dias não diferiram estatisticamente entre si.

Considerando as médias gerais dos tratamentos, T1 e T4 apresentaram os maiores teores de sólidos solúveis, com 8,19 °Brix e 7,83 °Brix, respectivamente. O tratamento controle T0 apresentou média de 7,37 °Brix e

comportamento estatisticamente semelhante a T1 e T4. O tratamento T2 apresentou média de 6,49 °Brix, enquanto T3 apresentou o menor valor, de 5,59 °Brix.

Entretanto, a interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa, demonstrando que o comportamento dos sólidos solúveis variou de acordo com o período de avaliação. Portanto, as médias gerais não devem ser interpretadas isoladamente, sendo necessário considerar o desdobramento da interação para identificar em quais períodos ocorreram diferenças entre os tratamentos.

Os sólidos solúveis constituem um importante parâmetro de qualidade em frutos cítricos, pois estão relacionados aos compostos solúveis presentes no suco, especialmente aos açúcares, influenciando o sabor, o índice tecnológico e a qualidade comercial dos frutos. Em lima ácida Tahiti, Huynh et al. (2024) destacaram que o teor de sólidos solúveis, a acidez titulável, a porcentagem de suco e o índice tecnológico são parâmetros relevantes para a avaliação da qualidade durante o armazenamento pós-colheita.

As variações nos sólidos solúveis podem ocorrer em função da atividade metabólica dos frutos, especialmente da respiração celular e do consumo ou transformação de compostos de reserva presentes no suco. Em frutos cítricos, os sólidos solúveis estão relacionados principalmente aos açúcares, como sacarose, glicose e frutose, que influenciam diretamente o sabor e a qualidade comercial dos frutos (Xiong et al., 2025).

Os maiores valores médios observados em T1 e T4 sugerem maior manutenção dos compostos solúveis em comparação aos tratamentos T2 e T3. Entretanto, como T1 e T4 apresentaram comportamento semelhante ao controle e houve interação significativa, não é possível atribuir a manutenção dos sólidos solúveis exclusivamente à aplicação desses recobrimentos.

Os recobrimentos pós-colheita podem atuar como barreiras semipermeáveis às trocas gasosas, reduzindo a taxa respiratória e a perda de água e contribuindo para a preservação da qualidade química dos frutos. Por outro lado, recobrimentos com menor eficiência na modulação dessas trocas podem resultar em maior consumo de substratos metabólicos e,

consequentemente, em menores valores de sólidos solúveis durante o armazenamento (Aljabary et al., 2025).

A acidez titulável apresentou redução de aproximadamente 22,7% nos primeiros quatro dias de armazenamento, passando de 3,97 mg g⁻¹ no dia 0 para 3,07 mg g⁻¹ aos 4 dias. Aos 8 e 11 dias, foram registrados valores de 3,12 mg g⁻¹ e 2,97 mg g⁻¹, respectivamente, sem diferença estatística em relação ao quarto dia (Tabela 1).

Considerando as médias gerais dos tratamentos, o controle T0 apresentou o maior valor de acidez titulável, com 4,02 mg g⁻¹, diferindo significativamente dos tratamentos com recobrimentos. Os tratamentos T1, T2 e T4 apresentaram médias de 3,48, 3,38 e 3,09 mg g⁻¹, respectivamente, sem diferença entre si. O tratamento T3 apresentou o menor valor, de 2,43 mg g⁻¹.

A interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa, indicando que as diferenças entre os tratamentos variaram ao longo do período experimental. Portanto, embora o controle tenha apresentado a maior média geral, a interpretação da acidez deve considerar o comportamento de cada tratamento nos diferentes períodos de armazenamento (material suplementar – S1).

A redução dos ácidos orgânicos é comum durante o armazenamento, pois esses compostos podem ser utilizados como substratos energéticos nas vias metabólicas da respiração celular. Esse processo está relacionado à manutenção da atividade metabólica dos frutos após a colheita e contribui para alterações na composição química ao longo do armazenamento (Acioly, 2018; Huynh et al., 2024).

O menor valor médio observado no tratamento T3 pode indicar maior consumo ou transformação dos ácidos orgânicos nos frutos submetidos a esse recobrimento. Entretanto, considerando a interação significativa e o comportamento das demais variáveis, esse resultado deve ser interpretado com cautela. Estudos adicionais são necessários para avaliar a influência da formulação sobre a respiração e o metabolismo dos ácidos orgânicos.

O teor de ácido ascórbico apresentou redução durante o armazenamento, passando de 30,86 mg g⁻¹ no dia 0 para 23,00 mg g⁻¹ aos 4 dias e 21,63 mg g⁻¹

aos 8 dias. Aos 11 dias, ocorreu aumento para 23,82 mg g⁻¹, embora esse valor tenha permanecido inferior ao observado no início do experimento (Tabela 1).

Considerando as médias gerais dos tratamentos, T4 apresentou o maior teor de ácido ascórbico, com 27,94 mg g⁻¹, diferindo significativamente dos demais tratamentos. O controle T0 apresentou valor intermediário de 25,89 mg g⁻¹, enquanto T1, T2 e T3 apresentaram as menores médias, de 22,98, 23,49 e 23,83 mg g⁻¹, respectivamente.

Entretanto, a interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa, indicando que o efeito dos recobrimentos sobre o ácido ascórbico variou de acordo com o período de avaliação. Dessa forma, a superioridade média de T4 não deve ser interpretada como um efeito constante durante todo o armazenamento, sendo necessário considerar o desdobramento da interação.

O ácido ascórbico é um dos principais compostos bioativos presentes nos frutos cítricos, sendo utilizado como indicador da qualidade nutricional e do estado fisiológico durante o armazenamento pós-colheita. A redução do teor de vitamina C pode estar associada aos processos oxidativos e ao metabolismo dos tecidos, que promovem a degradação desse composto com o avanço da senescência (Chavan et al., 2023; Huynh et al., 2024).

O teor de clorofila a (Chl a) reduziu significativamente durante o armazenamento, passando de 0,039 mg g⁻¹ aos 4 dias para 0,030 mg g⁻¹ aos 8 dias e 0,025 mg g⁻¹ aos 11 dias (Tabela 2). Entre o quarto e o décimo primeiro dia, essa redução correspondeu a aproximadamente 35,9%. Os valores observados aos 8 e 11 dias não diferiram estatisticamente entre si.

Considerando as médias gerais dos tratamentos, T1 apresentou o maior teor de clorofila a, com 0,052 mg g⁻¹. O tratamento T2 apresentou média de 0,031 mg g⁻¹, enquanto T0 e T3 apresentaram 0,025 mg g⁻¹. O tratamento T4 apresentou o menor valor, de 0,023 mg g⁻¹. Entretanto, como a interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa, essas médias devem ser interpretadas em conjunto com o desdobramento da interação, pois o desempenho dos tratamentos variou ao longo do armazenamento (material suplementar – S2).

Tabela 2. Teores de clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), clorofila total (Chl Total) e carotenoides frutos de lima ácida Tahiti submetidos a diferentes revestimentos nanoestruturados e armazenados por 0, 4, 8 e 11 dias. T0: controle em água destilada; T1: Nano CA; T2: nano quitosana/TPP + G + P, sem Nano CA; T3: 5% da formulação base com Nano CA + 10% de nano quitosana/TPP; T4: 10% da formulação base com Nano CA + 10% de nano quitosana/TPP. Todos os tratamentos foram aplicados por 1 min.

Fatores	Parâmetros			
	Chl a	Chl b	Chl Total	Carotenoides
Dias (A)	mg.g ⁻¹	mg.g ⁻¹	mg.g ⁻¹	mg.g ⁻¹
4	0,039 a	0,050 a	0,025 a	0,0022 a
8	0,030 b	0,012 b	0,010 b	0,0017 b
11	0,025 b	0,010 b	0,007 c	0,0016 b
Tratamento (B)				
T0	0,025 bc	0,011 b	0,009 b	0,0018 b
T1	0,052 a	0,075 a	0,032 a	0,0023 a
T2	0,031 b	0,010 b	0,011 b	0,0018 b
T3	0,025 bc	0,013 b	0,009 b	0,0016 b
T4	0,023 c	0,012 b	0,008 b	0,0016 b
AxB	61,91**	182,00**	123,06**	34,13**
C.V. (%)	17,37	26,55	20,4	14,53

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para cada fator (Dias ou Tratamentos), não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). AxB: interação entre dias e tratamentos; **: significativo a 1% de probabilidade; CV: coeficiente de variação.

A redução do teor de clorofila a durante o armazenamento era esperada, uma vez que o amarelecimento da casca é um processo natural associado a senescência dos frutos cítricos (Habibi et al., 2023). Esse processo envolve a degradação das moléculas de clorofila presentes no flavedo, favorecendo a perda gradual da coloração verde da casca. O fenômeno está relacionado à continuidade da atividade metabólica após a colheita e é frequentemente

observado em limas ácidas e em outros frutos cítricos durante o armazenamento (Habibi et al., 2023; Huynh et al., 2024).

A clorofila b apresentou comportamento semelhante ao da clorofila a, com redução de $0,050 \text{ mg g}^{-1}$ aos 4 dias para $0,012 \text{ mg g}^{-1}$ aos 8 dias e $0,010 \text{ mg g}^{-1}$ aos 11 dias. Entre o quarto e o décimo primeiro dia, a redução foi de aproximadamente 80%. Os valores observados aos 8 e 11 dias não diferiram estatisticamente entre si.

Entre os tratamentos, T1 apresentou a maior média de clorofila b, com $0,075 \text{ mg g}^{-1}$, enquanto os demais tratamentos apresentaram valores entre $0,010$ e $0,013 \text{ mg g}^{-1}$ e não diferiram estatisticamente entre si. Apesar da maior média geral observada em T1, a interação significativa demonstra que o efeito desse tratamento não foi constante durante todo o período de armazenamento.

A degradação da clorofila b ocorre paralelamente ao avanço da senescência e às alterações fisiológicas e oxidativas dos tecidos da casca. Dessa forma, a redução observada está associada à continuidade do metabolismo pós-colheita e à perda gradual da integridade dos pigmentos presentes no flavedo (Habibi et al., 2023; Jurić et al., 2024).

A clorofila total também apresentou redução significativa durante o armazenamento, passando de $0,025 \text{ mg g}^{-1}$ aos 4 dias para $0,010 \text{ mg g}^{-1}$ aos 8 dias e $0,007 \text{ mg g}^{-1}$ aos 11 dias. Essa variação correspondeu a uma redução de aproximadamente 72% entre o quarto e o décimo primeiro dia. Diferentemente das clorofilas a e b, os valores registrados aos 8 e 11 dias diferiram estatisticamente entre si, demonstrando que a degradação da clorofila total continuou até o final do armazenamento.

Considerando as médias gerais dos tratamentos, T1 apresentou o maior teor de clorofila total, com $0,032 \text{ mg g}^{-1}$. Os tratamentos T0, T2, T3 e T4 apresentaram valores entre $0,008$ e $0,011 \text{ mg g}^{-1}$, sem diferença estatística entre si. Entretanto, devido à interação significativa, a maior média de T1 deve ser interpretada com cautela, pois o comportamento desse tratamento variou entre os períodos de avaliação.

A preservação das clorofilas está diretamente relacionada à manutenção da qualidade visual dos frutos, uma vez que a coloração verde da casca constitui

um dos principais atributos valorizados na comercialização da lima ácida Tahiti. A degradação desses pigmentos favorece o aparecimento de tonalidades amareladas, reduzindo a aceitação comercial dos frutos (Chavan et al., 2023; Huynh et al., 2024).

Os carotenoides apresentaram redução significativa durante o armazenamento, passando de $0,0022 \text{ mg g}^{-1}$ aos 4 dias para $0,0017 \text{ mg g}^{-1}$ aos 8 dias e $0,0016 \text{ mg g}^{-1}$ aos 11 dias. Essa redução correspondeu a aproximadamente 27,3% entre o quarto e o décimo primeiro dia. Os valores observados aos 8 e 11 dias não diferiram estatisticamente entre si.

Entre os tratamentos, T1 apresentou a maior média de carotenoides, com $0,0023 \text{ mg g}^{-1}$. Os tratamentos T0 e T2 apresentaram $0,0018 \text{ mg g}^{-1}$, enquanto T3 e T4 apresentaram $0,0016 \text{ mg g}^{-1}$. Esses quatro tratamentos não diferiram estatisticamente entre si. Entretanto, a interação significativa indica que a maior média de T1 não representa necessariamente um efeito constante ao longo de todo o armazenamento.

Em frutos cítricos, os carotenoides tornam-se visualmente mais evidentes à medida que ocorre a degradação das clorofilas e a perda da coloração verde da casca. Entretanto, processos oxidativos e o avanço da senescência também podem promover a degradação desses compostos ao longo do armazenamento (Habibi et al., 2023; Huynh et al., 2024).

De modo geral, T1 apresentou as maiores médias de clorofila a clorofila b, clorofila total e carotenoides. Contudo, como a interação entre os períodos de armazenamento e os tratamentos foi significativa para todos os pigmentos, não é possível concluir, apenas com base nas médias gerais, que T1 tenha sido superior durante todo o período experimental. A interpretação definitiva deve considerar o desdobramento da interação, identificando em quais dias ocorreram diferenças entre os tratamentos.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que os recobrimentos nanoestruturados à base de quitosana e cera de abelha influenciaram alguns atributos de qualidade pós-colheita da lima ácida Tahiti, embora os efeitos tenham variado conforme a formulação e o período de armazenamento. Os tratamentos T1, composto por nanopartículas de cera de abelha, e T2, à base de nanopartículas de quitosana, reduziram a perda de massa fresca acumulada em comparação ao tratamento controle, evidenciando potencial para diminuir a perda de água dos frutos.

Os recobrimentos não influenciaram significativamente a incidência de podridão e oleocelose. Para o rendimento de suco, os sólidos solúveis, a acidez titulável, o ácido ascórbico e os pigmentos da casca, foram observados interações significativas entre tratamentos e períodos de armazenamento, demonstrando que o comportamento das formulações não foi constante ao longo do experimento. O tratamento T4 apresentou a maior média geral de ácido ascórbico, enquanto T1 apresentou as maiores médias gerais de clorofilas e carotenoides. Entretanto, esses resultados variaram entre os períodos de avaliação, não permitindo afirmar que um único tratamento tenha sido superior em todos os atributos e durante todo o armazenamento.

Dessa forma, os recobrimentos nanoestruturados avaliados apresentam potencial para a conservação pós-colheita da lima ácida Tahiti, especialmente pela redução da perda de massa fresca acumulada. Contudo, são necessários estudos adicionais para otimizar as formulações e compreender melhor sua atuação sobre os frutos, incluindo avaliações do perfil respiratório, da permeabilidade, da estabilidade dos recobrimentos e da interação com a superfície da casca durante períodos mais prolongados de armazenamento.

REFERÊNCIAS

ACIOLY, T. M. da S. Influência das etapas de colheita e pós-colheita na qualidade e conservação da lima ácida Tahiti. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

ALEMU, Tolcha Techane; INTIPUNYA, Pilairuk; GEBEYO, Bogale Abebe. A comprehensive review of edible coatings for postharvest management of fruits and vegetables: enhancing food and nutrition security. *Discover Agriculture*, London, v. 3, art. 190, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00348-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44279-025-00348-8>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ALJABARY, A. M. A. O.; AWLQADR, F. H.; ALTEMIMI, A. B.; ABDULRAHMAN, A. B. M.; SAEED, M. N.; HESARINEJAD, M. A. Advances in oil-based edible coatings for postharvest preservation of fruits and vegetables: a comprehensive review of biopolymer types, functional plant oils, nanoemulsion systems, and application techniques. *Journal of Agriculture and Food Research*, Amsterdam, v. 24, art. 102425, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102425>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102425>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS – ABRAFRUTAS. Brasil se torna o quinto maior exportador mundial de limão. Brasília, DF: Abrafrutas, 10 set. 2025. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2025/09/brasil-se-torna-o-quinto-maior-exportador-mundial-de-limao/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

BARROS, J. C. da S. M.; CELESTINO, R. C. A. A cultura da lima ácida Tahiti: recomendações técnicas. Niterói: Pesagro-Rio, 2024. 34 p. il. (Pesagro-Rio. Documentos Online, 10). Disponível em: https://www.rj.gov.br/pesagro/sites/default/files/arquivos_paginas/DOC%20Online%2010%20A%20cultura%20da%20lima%20%C3%A1cida%20Tahiti%20Recomenda%C3%A7%C3%B5es%20t%C3%A9cnicas.pdf. Acesso em: 11 jun. 2026.

BARROS-ALEXANDRINO, T. T. Síntese e caracterização de nanopartículas de quitosana-tripolifosfato e seu potencial como antifúngico natural para aplicação por aspersão em frutos frescos. 2020. 93 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

BERTOLO, M. R. V. et al. Improvement of the physical-chemical, microbiological, volatiles and sensory quality of strawberries covered with chitosan/gelatin/pomegranate peel extract-based coatings. *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 471, art. 142755, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142755>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39764943/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

CUNHA, D. A. L. V.; BARROS-ALEXANDRINO, T. T.; ASSIS, O. B. G. de. Otimização do processo de obtenção de nanopartículas de quitosana-TPP pelo método de gelificação ionotrópica. In: WORKSHOP DA REDE DE NANOTECNOLOGIA APLICADA AO AGRONEGÓCIO, 9., 2017, São Carlos. *Anais [...]*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2017. p. 56-59.

CHAVAN, P. et al. Recent advances in the preservation of postharvest fruits using edible films and coatings: a comprehensive review. *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 418, art. 135916, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135916>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37001356/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

COMPANHIA DE ENTREPOSTOS E ARMAZÉNS GERAIS DE SÃO PAULO – CEAGESP. Limão. São Paulo: CEAGESP, 2023. Disponível em: <https://ceagesp.gov.br/hortiescolha/hortipedia/limao/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

DAI, Limin; WANG, Xiaoshuai; ZHANG, Jun; LI, Changwei. Application of chitosan and its derivatives in postharvest coating preservation of fruits. *Foods*, Basel, v. 14, n. 8, art. 1318, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14081318>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/8/1318>. Acesso em: 10 jun. 2026.

ESHGHI, S. et al. Effects of polysaccharide-based coatings on postharvest storage life of grape: measuring the changes in nutritional, antioxidant and phenolic compounds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, New York, v. 16, n. 2, p. 1159-1170, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01275-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11694-021-01275-0>. Acesso em: 11 jun. 2026.

GALUS, Sabina et al. The effect of whey protein-based edible coatings incorporated with lemon and lemongrass essential oils on the quality attributes of fresh-cut pears during storage. *Coatings*, Basel, v. 11, n. 7, art. 745, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11070745>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/7/745>. Acesso em: 11 jun. 2026.

HABIBI, F. et al. Citrus fruit pigments. Gainesville: University of Florida, IFAS Extension, 2023. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1410>. Acesso em: 6 abr. 2026.

HABIBI, Fariborz; SARKHOSH, Ali; RITENOUR, Mark A.; BRECHT, Jeffrey K. Postharvest physiological disorders of blood orange fruit. Gainesville: University of Florida, IFAS Extension, 2025. Disponível em: <https://ask.ifas.ufl.edu/publication/HS1501>. Acesso em: 11 jun. 2026.

HUANBUTTA, Kampanart; CHUTTONG, Bajaree; DANMEK, Khanchai; SRIAMORNSAK, Pornsak; SUWANPITAK, Kittipat; SANGNIM, Tanikan. Beeswax in pharmaceutical sciences: a comprehensive review of its chemical composition, functional applications, types, and formulation roles. *International Journal of Molecular Sciences*, Basel, v. 27, n. 8, art. 3486, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms27083486>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/27/8/3486>. Acesso em: 11 jun. 2026.

HUYNH, Tien Dat; KHA, Cao Thanh; NGUYEN, Van Anh. Changes in quality parameters and bioactive components of seedless lime fruit (*Citrus latifolia*) during cold storage. *Food Research*, Kuala Lumpur, v. 8, n. 2, p. 268-279, 2024. DOI: [https://doi.org/10.26656/fr.2017.8\(2\).619](https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(2).619). Disponível em: https://www.myfoodresearch.com/uploads/8/4/8/5/84855864/_31__fr-2022-619_huynh.pdf. Acesso em: 11 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ISHKEH, Shirin Rahmanzadeh; SHIRZAD, Habib; ASGHARI, Mohammadreza; ALIREZALU, Abolfazl; PATEIRO, Mirian; LORENZO, José M. Effect of chitosan nanoemulsion on enhancing the phytochemical contents, health-promoting components, and shelf life of raspberry (*Rubus sanctus* Schreber). *Applied Sciences*, Basel, v. 11, n. 5, art. 2224, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052224>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2224>. Acesso em: 11 jun. 2026.

JURIĆ, Marina; MASLOV BANDIĆ, Luna; CARULLO, Daniele; JURIĆ, Slaven. Technological advancements in edible coatings: emerging trends and applications in sustainable food preservation. *Food Bioscience*, Amsterdam, v. 58, art. 103835, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103835>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103835>. Acesso em: 11 jun. 2026.

KIM, Jinkyung et al. Synergistic design of Pickering emulsion inks of nanochitosan-alginate-beeswax for edible coating in fruit preservation. *Food Hydrocolloids*, Amsterdam, v. 167, art. 111462, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111462>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111462>. Acesso em: 10 jun. 2026.

LIN, Xiong; WEI, Qingjiang; ZENG, Lingcai; ZHAN, Minxuan; LI, Feng; CHEN, Jinyin; MA, Qiaoli. Osmolytes and CsAQP expression jointly influence water physiology in the peel and pulp of orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) fruit during postharvest water loss. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 15, art. 1475574, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1475574>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1475574/full>. Acesso em: 11 jun. 2026.

MAICELO-QUINTANA, Jorge L. et al. Potential application of bee products in food industry: an exploratory review. *Heliyon*, London, v. 10, n. 2, art. e24578, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24578>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10806293/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

MASWANGANYE, Lebogang T. C.; PILLAI, Sreejarani Kesavan; SIVAKUMAR, Dharini. Chitosan coating loaded with spearmint essential oil nanoemulsion for antifungal protection in soft citrus (*Citrus reticulata*) fruits. *Coatings*, Basel, v. 15, n. 1, art. 105, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15010105>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/15/1/105>. Acesso em: 10 jun. 2026.

MOHAMMADI, Mahbobeh; RASTEGAR, Somayeh; ROHANI, Abbas. Enhancing Mexican lime (*Citrus aurantifolia* cv.) shelf life with innovative edible coatings: xanthan gum edible coating enriched with *Spirulina platensis* and pomegranate seed oils. *BMC Plant Biology*, London, v. 24, art. 906, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05606-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12870-024-05606-3>. Acesso em: 11 jun. 2026.

MORADINEZHAD, Farid; ADIBA, Atman; RANJBAR, Azam; DOROSTKAR, Maryam. Edible coatings to prolong the shelf life and improve the quality of subtropical fresh/fresh-cut fruits: a review. *Horticulturae*, Basel, v. 11, n. 6, art. 577, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060577>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/11/6/577>. Acesso em: 11 jun. 2026.

MOURA, Márcia Regina de; AOUADA, Fauze Ahmad; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli. Preparation of chitosan nanoparticles using methacrylic acid. *Journal of Colloid and Interface Science*, New York, v. 321, n. 2, p. 477-483, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.02.006>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18295778/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

MUSHTAQ, Abeeda et al. Recent insights into nanoemulsions: their preparation, properties and applications. *Food Chemistry: X*, Amsterdam, v. 18, art. 100684, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100684>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10149285/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

NAVARRO-CALDERÓN, Ángela; MAGWAZA, Lembe S.; TERRY, Leon A.; ALAMAR, M. Carmen. Unveiling biomarkers for postharvest resilience: the role of canopy position on quality and abscisic acid dynamics of 'Nadorcott' clementine mandarins. *Frontiers in Horticulture*, Lausanne, v. 3, art. 1353070, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1353070>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/horticulture/articles/10.3389/fhort.2024.1353070/full>. Acesso em: 11 jun. 2026.

NIU, Chenyu et al. Coating of layer-by-layer assembly based on chitosan and CMC: emerging alternative for quality maintenance of citrus fruit. *Horticulturae*, Basel, v. 9, n. 6, art. 715, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060715>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/6/715>. Acesso em: 10 jun. 2026.

NUNES, Catarina et al. Edible coatings and future trends in active food packaging—fruits' and traditional sausages' shelf life increasing. *Foods*, Basel, v. 12, n. 17, art. 3308, 2023. DOI: [10.3390/foods12173308](https://doi.org/10.3390/foods12173308). Disponível em: endereço eletrônico da publicação. Acesso em: 10 jun. 2026.

OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves de; MIRANDA, Marcela; FERREIRA, Marcos David; PLOTTO, Anne. Nanoemulsions as edible coatings: a potential strategy for fresh fruits and vegetables preservation. *Foods*, Basel, v. 10, n. 10, art. 2438, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10102438>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/10/2438>. Acesso em: 11 jun. 2026.

PEREZ-VAZQUEZ, Ana; BARCIELA, Paula; CARPENA, Maria; PRIETO, Miguel A. Edible coatings as a natural packaging system to improve fruit and vegetable shelf life and quality. *Foods*, Basel, v. 12, n. 19, art. 3570, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12193570>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/19/3570>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SÃO PAULO (Estado). Exportação de limão cresce 21% no estado de SP. Agência SP, São Paulo, 21 ago. 2025. Disponível em: <https://www.agenciasp.sp.gov.br/exportacao-de-limao-cresce-21-no-estado-de-sp/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

SAWTARIE, N.; CAI, Y.; LAPITSKY, Y. Preparation of chitosan/tripolyphosphate nanoparticles with highly tunable size and low polydispersity. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Amsterdam, v. 157, p. 110-117, 2017. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2017.05.055. Disponível em: endereço eletrônico do DOI. Acesso em: 11 jun. 2026.

SCHAFFAZICK, S. R.; GUTERRES, S. S.; FREITAS, L. L. de; POHLMANN, A. R. Caracterização e estabilidade físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administração de fármacos. *Química Nova*, São Paulo, v. 26, n. 5, p. 726-737, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000500017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/sjkQhvTyn78qtr8SnmkdVgC/?lang=pt>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SHARMA, Ramesh et al. Essential oil-nanoemulsion based edible coating: innovative sustainable preservation method for fresh/fresh-cut fruits and vegetables. *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 460, art. 140545, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140545>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39047488/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SORRENTINO, A.; GORRASI, G.; VITTORIA, V. Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 84-95, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.09.004>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.09.004>. Acesso em: 11 jun. 2026.

SPRICIGO, Poliana Cristina et al. Nano-chitosan as an antimicrobial agent in preservative solutions for cut flowers. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Hoboken, v. 96, n. 8, p. 2168-2175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.6766>. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003030000>. Acesso em: 11 jun. 2026.

STRANO, Maria Concetta; ALTIERI, Giuseppe; ALLEGRA, Maria; DI RENZO, Giovanni Carlo; PATERNA, Giuliana; MATERA, Attilio; GENOVESE, Francesco. Postharvest technologies of fresh citrus fruit: advances and recent developments for the loss reduction during handling and storage. *Horticulturae*, Basel, v. 8, n. 7, art. 612, 2022. DOI: 10.3390/horticulturae8070612. Disponível em: endereço eletrônico da publicação. Acesso em: 10 jun. 2026.

SULTAN, Maha; HAFEZ, Omais M.; SALEH, Malaka A.; YOUSSEF, Ahmed M. Smart edible coating films based on chitosan and beeswax-pollen grains for the postharvest preservation of Le Conte pear. *RSC Advances*, Cambridge, v. 11, n. 16, p. 9572-9585, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0RA10671B>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ra/d0ra10671b>. Acesso em: 11 jun. 2026.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. Foreign Agricultural Service. The rise of lime production in Brazil's citrus heartland. Brasília, DF: USDA/FAS, 8 set. 2025. GAIN Report n. BR2025-0034. Preparado por Carolina Castro. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=The+>

Rise+of+Lime+Production+in+Brazil%27s+Citrus+Heartland_Brasilia_Brazil_BR2025-0034.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

XIONG, Bo et al. Effects of different postharvest treatments on fruit quality, sucrose metabolism, and antioxidant capacity of 'Newhall' navel oranges during storage. *Plants*, Basel, v. 14, n. 5, art. 802, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14050802>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/5/802>. Acesso em: 10 jun. 2026.

ZAMBRANO-ZARAGOZA, M. L.; MERCADO-SILVA, E.; RAMÍREZ-ZAMORANO, P.; CORNEJO-VILLEGAS, M. A.; GUTIÉRREZ-CORTEZ, E.; QUINTANAR-GUERRERO, D. Use of solid lipid nanoparticles (SLNs) in edible coatings to increase guava (*Psidium guajava* L.) shelf-life. **Food Research Interna“G + P+ Nano CA” / “completando o restante...”tional**, v. 51, n. 2, p. 946-953, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.012>.

ZDULSKI, Jan Aleksander; RUTKOWSKI, Krzysztof P.; KONOPACKA, Dorota. Strategies to extend the shelf life of fresh and minimally processed fruit and vegetables with edible coatings and modified atmosphere packaging. *Applied Sciences*, Basel, v. 14, n. 23, art. 11074, 2024. DOI: 10.3390/app142311074. Disponível em: endereço eletrônico da publicação. Acesso em: 10 jun. 2026.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1 – Desdobramento da interação entre os fatores dias de armazenamento (A) e tratamentos (B) para perda de massa fresca diária (PMFD), rendimento de suco, sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT) e ácido ascórbico (AA).

PMFD (%)					
Tratamento (B)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
0	0,00 dA	0,00 dA	0,00 dA	0,00 cA	0,00 cA
4	1,98 cA	1,56 cB	1,64 cAB	1,66 bAB	1,63 bAB
8	3,29 aA	3,29 aA	3,30 aA	3,50 aA	3,52 aA
11	2,46 bA	2,28 bAB	2,07 bAB	1,95 bB	1,98 bB
Rendimento (%)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
0	43,87 abA	43,87 abA	43,87 bA	43,87 bcA	43,87 bA
4	36,62 cA	38,94 bA	40,53 bA	38,75 cA	41,04 bA
8	41,66 bcB	48,50 aA	45,57 bAB	50,42 aA	51,50 aA
11	47,96 aA	46,00 aA	51,96 aA	48,19 abA	50,62 aA
SS (°Brix)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
0	8,20 aA	8,20 aA	8,20 aA	8,20 aA	8,20 aA
4	8,10 aB	10,35 aA	5,50 bC	4,96 bC	6,85 aBC
8	6,48 aAB	6,76 bAB	6,63 abAB	5,16 bB	8,10 aA
11	6,71 aAB	7,45 bAB	5,65 bBC	4,05 bC	8,18 aA
AT (mg.g ⁻¹)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
0	3,97 bA	3,97 bA	3,97 bA	3,97 bA	3,97 bA
4	3,87 bA	3,83 abA	3,31 aA	2,12 bB	2,19 bB
8	5,01 aA	3,04 bB	3,14 aB	1,85 bC	2,56 bBC
11	3,22 bA	3,07 abA	3,12 aA	1,80 bB	3,64 aA
AA (mg.g ⁻¹)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
0	30,86 a	30,86 a	30,86 a	30,86 a	30,86 a
4	22,65 c	20,35 b	18,51 c	25,37 b	27,43 b
8	23,31 c	20,42 b	22,63 b	20,57 c	21,94 c
11	26,74 b	21,00 b	21,94 b	18,51 c	31,55 a

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para comparação entre os dias de armazenamento dentro de cada tratamento, e pela mesma letra maiúscula na linha, para comparação entre os tratamentos dentro de cada

período de armazenamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

Tabela S2 – Desdobramento da interação entre os fatores dias (A) e tratamento (B) para os teores de pigmentos (clorofilas a, b e total e carotenoides).

Chl a (mg.g⁻¹)					
Tratamento (B)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
4	0,041 aB	0,107 aA	0,031 abB	0,01 bBC	0,022 aBC
8	0,019 bB	0,038 bA	0,039 aA	0,030 aAB	0,024 aB
11	0,015 bC	0,010 cC	0,025 bB	0,028 abB	0,022 aBC
Chl b (mg.g⁻¹)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
4	0,01 abB	0,206 aA	0,010 aB	0,012 aB	0,013 aB
8	0,005 bA	0,017 bA	0,012 aA	0,015 aA	0,013 aA
11	0,018 aA	0,002 cB	0,008 aAB	0,012 aAB	0,009 aAB
Chl Total (mg.g⁻¹)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
4	0,009 aB	0,081 aA	0,014 aB	0,010 aB	0,011 aB
8	0,011 aB	0,011 bAB	0,012 abA	0,011 aAB	0,007 aAB
11	0,006 aA	0,003 cB	0,008 bAB	0,007 aAB	0,007 aAB
Carotenoides (mg.g⁻¹)					
Dias (A)	T0	T1	T2	T3	T4
4	0,0018 bB	0,0041 aA	0,0019 aB	0,0015 aB	0,0017 aB 0,0016
8	0,0010 cC	0,0023 bA	0,0019 aAB	0,0018 aAB	aBC
11	0,0026 aA	0,0005 cC	0,0016 aB	0,0016 aB	0,0016 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna (comparação entre dias de armazenamento dentro de cada tratamento) e pela mesma letra maiúscula na linha (comparação entre tratamentos dentro de cada dia de armazenamento) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade