



HANNA ELISIA ARAÚJO DE BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS ATIVAS A
PARTIR DE MANTAS POLIMÉRICAS
NANOESTRUTURADAS E APLICAÇÃO NA PÓS-COLHEITA
DE FRUTAS**

**LAVRAS – MG
2023**

HANNA ELISIA ARAÚJO DE BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS ATIVAS A PARTIR DE MANTAS
POLIMÉRICAS NANOESTRUTURADAS E APLICAÇÃO NA PÓS-COLHEITA DE
FRUTAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência dos Alimentos, área de
concentração em Ciência dos Alimentos, para a
obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Eduardo Valério de Barros Vilas Boas
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Franco
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Barros, Hanna Elisia Araújo de.

Desenvolvimento de embalagens ativas a partir de mantas
poliméricas nanoestruturadas e aplicação na pós-colheita de frutas /
Hanna Elisia Araújo de Barros. - 2023.

116 p. : il.

Orientador(a): Eduardo Valério de Barros Vilas Boas.

Coorientador(a): Marcelo Franco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Embalagens. 2. Nanomateriais. 3. Pós-colheita. I. Vilas Boas,
Eduardo Valério de Barros. II. Franco, Marcelo. III. Título.

HANNA ELISIA ARAÚJO DE BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS ATIVAS A PARTIR DE MANTAS
POLIMÉRICAS NANOESTRUTURADAS E APLICAÇÃO NA PÓS-COLHEITA DE
FRUTAS**

**DEVELOPMENT OF ACTIVE PACKAGING FROM NANOSTRUCTURED
POLYMERIC MATS AND APPLICATION IN FRUIT POST-HARVEST**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência dos Alimentos, área de
concentração em Ciência dos Alimentos, para a
obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 12 de abril de 2023.

Dr^a Maria Alice Martins EMBRAPA
Dr^a Raquel Guidetti Vendruscolo UFVJM
Prof. Dr. Júlio Cesar Ugucioni UFLA
Prof. Dr. Lenilton Santos Soares UFLA

Prof. Dr. Eduardo Valério de Barros Vilas Boas
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Franco
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

À minha avó Magnólia e ao meu avô Dalmiro (*in memoriam*) que foram meus exemplos de vida...

À minha tia Dalcinolia e à minha mãe Leonora, que nunca mediram esforços para que meus desejos se realizassem...

Aos meus professores (as) e orientadores, que possibilitam o meu crescimento profissional...

Ao meu marido Caio, meu porto seguro e companheiro de todas as horas...

À todas as pessoas que participaram dessa jornada juntamente comigo e a tornam mais simples...

...DEDICO!

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ser a minha fortaleza, que com o seu infinito amor está a me sustentar todos os dias e a derramar bênçãos sobre mim.

À Universidade Federal de Lavras, por todas as oportunidades oferecidas durante todos esses anos em que aqui estive e por disponibilizar infraestrutura, laboratórios multiusuários, assim como investimentos direcionados à qualidade do ensino e bem-estar dos alunos.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos (PPGCA), pela oportunidade de ingressar em um curso de excelência internacional, pelo incentivo à pesquisa e publicações em periódicos de alto fator de impacto, pelas capacitações ofertadas, pela concessão da bolsa de estudos e pela disponibilidade de recursos e pessoal que me permitiram realizar o trabalho.

Ao Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) pela disponibilidade de laboratórios, em especial o Laboratório de Pós-colheita de Frutas e Hortaliças, infraestruturas e docentes, técnicos e funcionários que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal, assim como possibilitaram a realização deste trabalho e o meu crescimento profissionalmente.

Aos Laboratórios de Materiais e Biosistemas (LAMAB), assim como o Multiusuários de Energias Renováveis e Materiais Avançados (LABERMA) pela disponibilização do espaço e infraestruturas necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Às agências de fomento, Fapemig, Capes e CNPq, pelo apoio financeiro essencial à aquisição e manutenção de infraestrutura e suporte à pesquisa, indispensáveis para a realização desse trabalho. À Fapemig, ainda, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Prof. *DSc.* Eduardo Valério de Barros Vilas Boas, por todos conhecimentos e orientações passadas ao longo desses anos, pela infraestrutura disponibilizada, pela amizade, atenção e apoio, também por toda confiança depositada em mim e pelas oportunidades de pesquisas e estudos, as quais foram imprescindíveis para o meu crescimento profissional.

Ao meu coorientador, Prof. *DSc.* Marcelo Franco, pela amizade, pelos aconselhamentos, por todo apoio, atenção, por toda confiança depositada em mim, pelas oportunidades de crescimento profissional, desde o mestrado.

À Prof.^a DSc. Elisângela Elena Nunes de Carvalho, pelo carinho, aconselhamentos, amizade, acolhimento, pela oportunidade de crescimento profissional e por ter exercido papel importante em minha estadia em Lavras-MG.

Ao Prof. DSc. Juliano Elvis de Oliveira pela confiança depositada em mim, pela amizade, pelos aconselhamentos, por todo apoio, pelas oportunidades de crescimento profissional e por ter disponibilizado o espaço e infraestrutura necessários para realização do trabalho.

Ao meu marido, Caio Natarelli, meu porto seguro, por sempre me apoiar e incentivar a crescer pessoal e profissionalmente, por todo amor, por sempre ter muita paciência comigo, por caminhar junto comigo e ser meu companheiro nessa montanha-russa que é a vida.

À minha tia Dalcinolia e à minha mãe Leonora, por serem minha base e sempre estarem presentes, me apoiando em todos os momentos, pelos incentivos, paciência em todas as fases da minha vida, além do seu amor incondicional.

Aos meus avós maternos (*in memoriam*), por serem os meus exemplos de vida, cujos ensinamentos fazem com que eu siga com determinação e consiga conquistar o horizonte.

A todos os colegas e amigos que fizeram parte da equipe de trabalho do Laboratório de Pós-colheita de Frutas e Hortaliças ao longo do tempo que estive por lá, em especial à atual equipe, por toda ajuda nos experimentos, pelas trocas de experiências, por todos os maravilhosos momentos de convivência, que tornaram a jornada mais leve e prazerosa, sobretudo no momento da pandemia, repleto de inseguranças e incertezas.

A todos meus familiares e amigos (as), por me aguentarem, pelo apoio, conselhos, força e tudo mais.

À banca avaliadora pela presença, contribuição e pelo tempo disponibilizando.

Enfim, agradeço a todos, que de formas diferentes contribuíram para o meu crescimento, amadurecimento e realização de mais uma etapa da minha vida.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

As frutas são suscetíveis a diversas perdas pós-colheita e sistemas de embalagens ativas, além de serem barreiras físicas, também agem prolongando a vida útil desses alimentos. Esses sistemas apresentam compostos ativos que podem agir de várias formas, seja no alimento ou no *headspace* da embalagem, mantendo a qualidade do produto embalado por mais tempo. Pelo exposto e levando em consideração a escassez de estudos acerca da interação e aplicação de mantas poliméricas nanoestruturadas em alimentos, o presente estudo teve como objetivo desenvolver pela técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) e caracterizar nanofibras de poli (álcool vinil) em água (F_{Água}) e as enriquecidas com extratos aquosos de polpa de açaí (F_{AP}), farelo de cacau (F_{CS}), casca de jabuticaba (F_{JP}) e resíduo de cenoura (F_{CR}) e as nanofibras de poli (ácido lático) (PLA) controles (F_{Controle}) e com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado (F_{1-MCP}). Assim como, avaliar a viabilidade de tecnológica de aplicação dessas nanofibras em sistemas de embalagens ativas destinadas para a manutenção da qualidade pós-colheita de morangos e bananas, respectivamente. No primeiro estudo, observou-se que as nanofibras F_{AP}, F_{CS}, F_{JP} e F_{CR} apresentaram maiores semelhanças entre si e grandes diferenças, principalmente em relação aos teores de compostos fenólicos (TPC), atividade antioxidante e fotoestabilidade, quando comparadas com as F_{Água}. As nanofibras de PVA apresentaram diâmetros médios inferiores à 600 nm e morfologia uniforme. As nanofibras F_{JP} e F_{Água} foram testadas como revestimento ativo comestível no armazenamento refrigerado de morangos íntegros. Observou-se uma desaceleração nos eventos relacionados à senescência, como alterações na cor superficial, degradação do TPC e a da atividade antioxidante e a ocorrência de frutos impróprios, principalmente aqueles frutos revestidos com F_{JP}, quando comparados com os morangos sem revestimento. No segundo estudo, por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) constatou-se que os diâmetros médios das nanofibras de PLA foram inferiores à 200 nm. A presença do complexo 1-MCP/ α -CD alterou as propriedades térmicas e reduziu a hidrofobicidade das nanofibras. Sendo assim, por meio das análises de caracterização das nanofibras foi possível inferir que os cristais do complexo 1-MCP/ α -CD foram encapsulados, e se encontram na superfície das nanofibras F_{1-MCP}. Ambas nanofibras de PLA foram testadas como nano-sachês no armazenamento refrigerado de bananas 'Prata' íntegras, no estágio verde de maturação. Com isso, confirmou-se que o nano-sachê contendo complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado liberou o gás bloqueador de etileno no *headspace* da embalagem, retardando aumento da taxa de respiração, do teor de sólidos solúveis e da acidez titulável, assim como a perda de massa e da firmeza e alterações na coloração das cascas dos frutos, durante o armazenamento, quando comparados às bananas das embalagens com o sachê de nanofibras controles e sem sachê. Ambos os estudos confirmaram a viabilidade da obtenção de nanofibras de PVA e PLA por SBS, bem como a aplicabilidade desses nanomateriais em sistemas de embalagens ativas utilizados para aumentar a vida útil e manter a qualidade pós-colheita de frutos.

PALAVRAS-CHAVE: Embalagens ativas. Nanomateriais. SBS. Antioxidante. 1-MCP. *Shelf life*.

ABSTRACT

Fruits are susceptible to various post-harvest losses and active packaging systems, in addition to being physical barriers, also act to extend the shelf life of these foods. These systems feature active compounds that can act in various ways, either in the food or in the packaging headspace, maintaining the quality of the packaged product for a longer time. Based on the above and taking into account the scarcity of studies on the interaction and application of nanostructured polymeric mats in food, the present study aimed to develop through the solution blow spinning (SBS) technique and characterize nanofibers of poly (vinyl alcohol) in water (F_{Water}) and those enriched with aqueous extracts of açai pulp (F_{AP}), cocoa shell (F_{CS}), jaboticaba peels (F_{JP}) and carrot residues (F_{CR}) and poly (lactic acid) (PLA) control (F_{Control}) and with encapsulated 1-MCP/ α -CD complex ($F_{1\text{-MCP}}$). As well as, to evaluate the technological feasibility of applying these nanofibers in active packaging systems intended for maintaining the post-harvest quality of strawberries and bananas, respectively. In the first study, it was observed that the nanofibers F_{AP} , F_{CS} , F_{JP} and F_{CR} presented greater similarities among themselves and great differences, mainly in relation to the contents of phenolic compounds (TPC), antioxidant activity and photostability, when compared with F_{Water} . PVA nanofibers had mean diameters below 600 nm and uniform morphology. The F_{JP} and F_{Water} nanofibers were tested as an edible active coating in the refrigerated storage of intact strawberries. There was a deceleration in events related to senescence, such as changes in surface color, degradation of TPC and antioxidant activity, and the occurrence of unsuitable fruits, especially those fruits coated with F_{JP} , when compared to uncoated strawberries. In the second study, using scanning electron microscopy (SEM), it was found that the mean diameters of the PLA nanofibers were less than 200 nm. The presence of the 1-MCP/ α -CD complex altered the thermal properties and reduced the hydrophobicity of the nanofibers. Thus, through the characterization analyzes of the nanofibers, it was possible to infer that the crystals of the 1-MCP/ α -CD complex were encapsulated and are found on the surface of the $F_{1\text{-MCP}}$ nanofibers. Both PLA nanofibers were tested as nano-sachets in the refrigerated storage of whole 'Prata' bananas, in the green stage of maturation. Thus, it was confirmed that the nano-sachet containing encapsulated 1-MCP/ α -CD complex released the ethylene-blocking gas in the headspace of the packaging, delaying the increase in respiration rate, soluble solids content and titratable acidity, as well as loss of mass and firmness and changes in the color of the fruit peels during storage, when compared to bananas in packages with the control nanofiber sachet and without sachet. Both studies confirmed the feasibility of obtaining PVA and PLA nanofibers by SBS, as well as the applicability of these nanomaterials in active packaging systems used to increase shelf life and maintain post-harvest fruit quality.

Keywords: Active packaging. Nanomaterials. SBS. Antioxidant. 1-MCP. Shelf life.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	10
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1. Mapa de coocorrências entre palavras-chaves.....	11
2.2. Embalagens e revestimentos para alimentos.....	14
2.2.1. Sistema de embalagem ativa	15
2.3. Extratos vegetais em sistema de embalagens antioxidantes	17
2.4. 1-Metilciclopropeno (1-MCP) em sistema de embalagens ativas	22
2.5. Nanotecnologia e o setor de embalagens para alimentos	26
2.5.1. Nanofibras poliméricas	27
2.5.2. Fiação por sopro em solução (<i>solution blow spinning</i> - SBS).....	28
2.5.3. Poli (ácido láctico) (PLA)	30
2.5.4. Poli (álcool vinílico) (PVA).....	33
2.6. Nanofibras poliméricas na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças	36
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS	38
REFERÊNCIAS.....	40
SEGUNDA PARTE: ARTIGOS	54
ARTIGO 1: Desenvolvimento de nanofibras de poli(álcool vinílico) incorporadas com extratos vegetais aquosos por fiação por sopro de solução e sua aplicação como revestimento de morangos	54
ARTIGO 2: Um novo nano-sachê produzido por fiação por sopro em solução para retardar amadurecimento de bananas usando mantas poliméricas nanoestruturadas biodegradáveis emissoras de 1-metilciclopropeno.....	90

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

As frutas e hortaliças, como morangos e bananas, estão sujeitas a perdas de pós-colheita, devido à sazonalidade de sua produção, condições de crescimento, perecibilidade, amadurecimento imprevisível, manuseio, transporte e armazenamento inadequado, que afetam sua qualidade fisiológica e sensorial, além de contribuir para possíveis riscos à saúde ou à integridade física do consumidor e para o desperdício desses alimentos. No armazenamento e transporte de frutas, normalmente, utilizam-se embalagens tradicionais, como filmes, bandejas, sacolas e caixas, entre outros, as quais são desenvolvidas para serem as mais inertes possíveis e proteger os alimentos apenas como barreiras físicas aos danos mecânicos, químicos e contaminação microbiológica.

Tecnologias e materiais de embalagens inovadoras estão sendo desenvolvidas para resolver ou reduzir perdas pós-colheita em âmbito mundial. Deste modo, uma das alternativas emergentes para manter ou melhorar os aspectos sensoriais, de segurança e de qualidade do alimento, é o desenvolvimento de revestimento ou de sistemas de embalagens ativas, como aquelas com liberação de antioxidantes naturais ou com emissão de 1-metilciclopropeno (1-MCP), atrelados à utilização de nanomateriais, como as nanofibras poliméricas, tendo em vista que a nanotecnologia vem sendo relatada como a ciência que tem o poder transformar e melhorar as propriedades dos materiais que já são usados.

Os compostos antioxidantes naturais vão agir inibindo ou retardando reações oxidativas no produto embalado e podem ser extraídas a partir de matérias-primas vegetais convencionais, como a polpa do fruto açaí, e não convencionais, como o farelo de cacau (coproduto agroindustrial), a casca de jabuticaba (subproduto agroindustrial), e os resíduos do processamento mínimo de cenouras, tendo em vista que são fontes de composto bioativos, assim como seus extratos têm potencial atividade antioxidante. Já o 1-metilciclopropeno (1-MCP) é um gás que age bloqueando a ação do etileno, um fitormônio gasoso associado ao amadurecimento e senescência de frutos, principalmente os climatéricos. Comercialmente, o 1-MCP encontra-se em pó, normalmente complexado em uma α -cliclodextrina (1-MCP/ α -CD).

Dentre os nanomateriais que vêm ganhando notoriedade para a aplicação em alimentos estão as nanofibras poliméricas, uma vez que podem ser produzidas a partir de diferentes polímeros, sendo alguns biodegradáveis como o poli (álcool vinílico) (PVA) e poli (ácido láctico) (PLA). Outra vantagem desse tipo de nanomaterial é a capacidade de ser reforçada ou

enriquecida com ampla gama de materiais e compostos, os quais incluem os químicos e bioativos, entre outros. As nanofibras poliméricas quando conectadas por emaranhados físicos ou por adesão de contato entre si, sem qualquer tipo de trama entre elas, formam as mantas nanoestruturadas, consideradas não tecidos. Além disso, a produção de nanofibras poliméricas pela técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) ainda é emergente e pouco aplicada quando comparada com a técnica mais popular, a eletrofiação, ainda mais quando utiliza-se soluções poliméricas com solventes pouco voláteis, como soluções aquosas.

As novas demandas do mercado consumidor inclinam-se às políticas *Clean Label*, atreladas à segurança alimentar e dos alimentos, assim como à sustentabilidade, colaborando com o aumento do interesse em nanomateriais enriquecidos com compostos ativos seguros para embalagens que entram em contato direto com os alimentos. No entanto, na literatura existem lacunas, ainda não estudadas e passíveis de inovação, as quais englobam a produção de nanofibras poliméricas, pela da técnica SBS, destinadas à revestimentos ou à sistemas de embalagens ativas aplicadas na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar mantas nanoestruturadas de PVA enriquecidas com compostos antioxidantes extraídos de diferentes fontes vegetais (polpa de açaí, farelo de cacau, casca de jabuticaba e resíduos do processamento mínimo de cenouras) e de PLA com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado, por meio da técnica SBS. Assim como, avaliar a viabilidade de aplicação dessas mantas em sistemas de embalagens ativas destinadas para a manutenção da qualidade pós-colheita de morangos e bananas, respectivamente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Mapa de coocorrências entre palavras-chaves

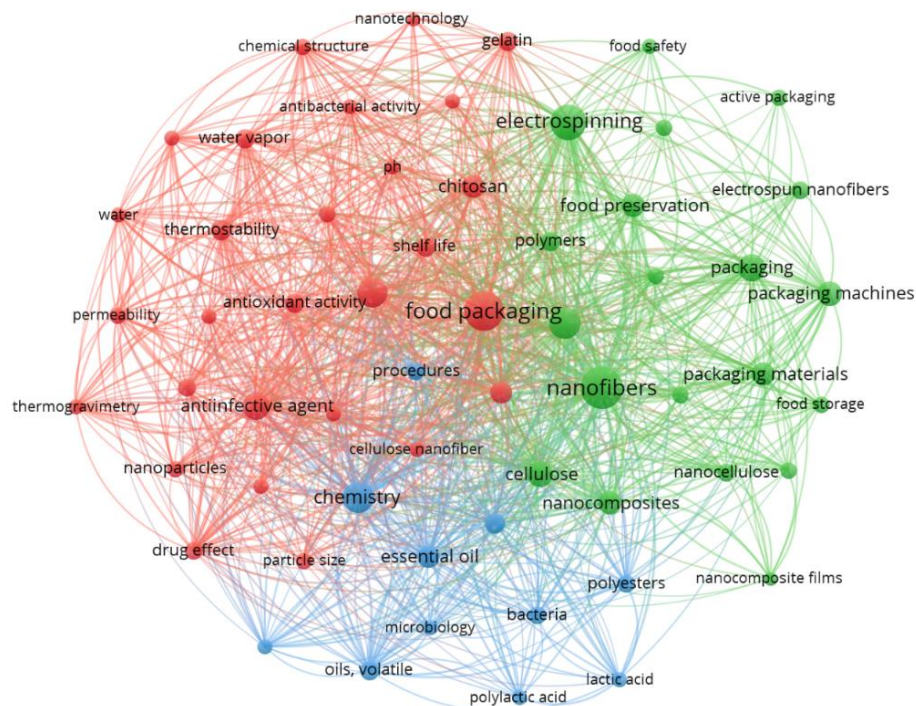
A análise das coocorrências entre grupos de palavras permite estabelecer índices estatísticos que representam a força de associação entre esses grupos e, a partir dos valores encontrados, elaborar diversos tipos de representações gráficas (árvores, redes, agrupamentos diversos) e, assim, mapear o estado de um campo do conhecimento, em um determinado momento (ROBREDO; CUNHA, 1998).

Para este referencial teórico, foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, buscando-se trabalhos que englobassem os temas alimentos (*food*), embalagem ativa (*active packaging*) e nanofibras (*nanofiber*), em concomitância. Com isso, no *Scopus* e *Web of Science* foram encontrados 170 e 126 trabalhos, respectivamente. Ao se

descartar os trabalhos em duplicidade, detectados mutuamente por ambas as bases, a pesquisa localizou, ao todo, 201 publicações diferentes, de 2008 a 2023, que reuniam 1992 palavras-chave. A análise de coocorrência foi aplicada utilizando as palavras-chave das publicações selecionadas, e ao se adotar o requisito de ocorrência mínima de 10, o total dessas palavras foi reduzido para 59. Evidenciou-se que o número de publicações relacionando os três temas abordados é crescente, tendo em vista que desde quando começaram as publicações a maior parte (178 publicações) se concentra nos últimos 5 anos.

Um panorama científico resultante do mapa de coocorrência dos termos pesquisados, obtido por meio do *software* VOSviewer, está apresentado na Figura 1, sendo que cada círculo representa um termo ou palavra-chave e o tamanho de cada palavra indica a utilização da mesma medida em termos de publicações. Além disso, as distâncias entre as palavras neste mapa também são importantes, logo, quanto menor a distância entre duas palavras-chave, maior o número de coocorrências (ISLAM *et al.*, 2018). Foi observado também que foram formados um total de 3 *clusters*, levando-se em consideração que as palavras com maior força de associação das palavras-chave encontram-se no mesmo grupo.

Figura 1 – Mapa de coocorrência de alimentos (*food*), embalagem ativa (*active packaging*) e nanofibras (*nanofiber*) de 2008 a 2023.



Fonte: Da autora (2023) (VOSviewer).

As palavras-chave com maior número de ocorrência observadas na análise no primeiro grupo, destacado em vermelho, foi embalagem para alimentos (*food packaging*) com 70 citações, no segundo *cluster*, em verde, encontram-se as palavras nanofibras (*nanofibers* - 90) e eletrofição (*electrospinning* - 61) e, por fim, no terceiro agrupamento foi a palavra química (*chemistry* - 50). Por este motivo, essas palavras encontram-se alocadas em circunferências no mapa de coocorrência (Figura 1) em maior destaque e tamanho, além de estarem associadas entre si, interligando as palavras coadjuvantes de seus respectivos *clusters* com as dos demais *clusters*.

As palavras-chave coadjuvantes são aquelas que aparecem com menor número de ocorrência, as quais tiveram entre 36 e 10 citações. Partindo desse pressuposto, as palavras-chave coadjuvantes relevantes para esta revisão de literatura, no primeiro agrupamento, encontram-se os assuntos agente anti-infectante (*antiinfective agent* - 36), quitosana (*chitosan* - 25), atividade antioxidante (*antioxidant activity* - 18), gelatina (*gelatin* - 17), *self life* (17), atividade antibactericida (*antibacterial activity* - 12), nanofibra de celulose (*cellulose nanofiber* - 12) e nanotecnologia (*nanotechnology* - 10). No segundo foram celulose (*cellulose* - 32), preservação de alimento (*food preservation* - 26), material para embalagem (*packaging material* - 26), polímeros (*polymers* - 18), armazenamento de alimentos (*food storage* - 13), embalagens ativas (*active packaging* - 13) e filme de nanocompósitos (*nanocomposite film* - 10). Já os temas óleos voláteis (*oils volatile* - 19), bactéria (*bacteria* - 15), óleo essencial (*essential oil* - 14), ácido láctico (*lactic acid* - 12), poli (ácido láctico) (*poly(lactic acid)* - 11) e microbiologia (*microbiology* - 11) destacaram-se no terceiro *cluster*.

Dessa forma, ao correlacionar as palavras palavras-chave com maior número de ocorrências (nanofibras, embalagem ativa, eletrofição e química) entre si e com as coadjuvantes, observa-se que o maior número das publicações referentes aos temas abordados está concentrado na área da conservação de alimentos, com a aplicação de embalagens com atividade antimicrobiana e antioxidante a partir de nanofibras poliméricas (celulose, gelatina, quitosana e PLA), tanto sob a forma de filme (*casting*) ou mantas nanoestruturadas eletrofiadas, observações essas que estão evidenciadas nos tópicos subjacentes deste referencial teórico. Além disso, observou-se também que assuntos relacionados à técnica de fição por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS), poli (álcool vinílico) (PVA), extratos aquosos de plantas, 1-metilciclopropeno (1-MCP) e pós-colheita de frutas e hortaliças não apareceram no mapa de coocorrência (Figura 1), o que indica a existência de poucos ou nenhum estudo abordando esses temas em conjunto e que há lacunas na literatura passíveis de serem exploradas.

2.2. Embalagens e revestimentos para alimentos

Embalagens, de modo geral, podem ser definidas como o invólucro de produtos ou itens, como uma bolsa, sacola, filme, caixa, copo, bandeja, lata, tubo, garrafa, ou outra forma de recipiente utilizadas para realizar uma ou mais das seguintes funções: contenção, proteção, preservação, comunicação, utilidade e desempenho (ROBERTSON, 2012; THE PACKAGING INSTITUTE INTERNATIONAL, 1988). Já Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 91/2001, que dispõe sobre critérios gerais e classificação de materiais para embalagens e equipamentos em contato com alimentos, define embalagens para alimentos como sendo o artigo que está em contato direto com alimentos, destinado a contê-los, desde a sua fabricação até a sua entrega ao consumidor, com a finalidade de protegê-los de agentes externos, de alterações e de contaminações, assim como de adulterações (BRASIL, 2001).

Já os revestimentos comestíveis são definidos como uma rede semipermeável, coesa por natureza, os quais normalmente são aplicados diretamente na superfície do produto alimentício em sua forma líquida e usando métodos como imersão, pulverização ou escovação (GASPAR; BRAGA, 2023; MANZOOR *et al.*, 2023). Assim como as embalagens tradicionais, os revestimentos podem retardar o processo de perda de umidade, manter a troca gasosa e, conseqüentemente, prolongar a vida útil dos produtos hortícolas. No entanto, essas propriedades mecânicas e de barreira são limitadas, o que necessariamente a utilização de um sistema de embalagem, juntamente com o revestimento (GASPAR; BRAGA, 2023).

Materiais destinados à produção de embalagens podem ser a base de papel, vidro, metais e matrizes poliméricas (plástico), sendo essa última a mais popular entre as indústrias de higiene pessoal, alimentos e bebidas, pois podem oferecer formas de revestimentos e embalagens flexíveis ou rígidas, transparentes e leves (GRAND VIEW RESEARCH, 2020). Além disso, os setores de embalagens, em especial o das primárias, e de revestimentos sempre estão em constante evolução, em paralelo ao surgimento de novas tecnologias, que ensejam a produção de embalagens ou revestimentos compatíveis com as tendências sociais altamente mutáveis. Essas tendências incluem, atualmente, a crescente demanda do consumidor por comodidade, recipientes mais sustentáveis (biodegradáveis) e com maior funcionalidade (barreira adequada a gases, proteção antioxidante, extensão do período de armazenamento, entre outros), sem renunciar à garantia da qualidade e segurança dos alimentos e alimentar (AHMED *et al.*, 2022;

CHEN *et al.*, 2023; PÉREZ-ESTEVE *et al.*, 2022; TRUBETSKAYA; SCHOLTEN; CORREDIG, 2022; WYRWA; BARSKA, 2017).

O setor de alimentos é responsável por mais de 51% do total das soluções avançadas de embalagem e é o principal fator que afeta o crescimento desse mercado (GRAND VIEW RESEARCH, 2019). Sendo assim, a nova geração de embalagens e revestimentos não serve apenas como uma barreira, mas interage com os alimentos e o consumidor (AHMED *et al.*, 2022; ROBERTSON, 2012). Informações a respeito do frescor do alimento podem ser detectadas pelas embalagens e transmitidas ao consumidor, como nos sistemas de embalagens inteligentes (FIROUZ; MOHI-ALDEN; OMID, 2021; ROBERTSON, 2012). Sistemas de embalagens ativas e/ou com atmosferas modificadas (MAP) estão disponíveis e são, normalmente, mais efetivas que as tradicionais na manutenção ou melhoria da qualidade dos produtos embalados (AHMED *et al.*, 2022; CHAN, 2022; ROBERTSON, 2012).

2.2.1. Sistema de embalagem ativa

O conceito de embalagem ativa surgiu pela primeira vez na década 90 (ROONEY, 1993). A Comissão Europeia adota, atualmente, em seu regulamento de nº 450/2009, a definição que preconiza que essas embalagens tenham, em sua matriz polimérica, componentes intencionalmente adicionados que permitem que materiais sejam incorporados no alimento embalado, ou removidos dele, por meio do contato direto ou do ambiente que o circunda, a fim de melhorar a sua qualidade ou estender sua vida útil (EUROPEAN COMMISSION, 2009). Esse tipo de sistema pode e já vem sendo aplicado em diversos tipos de alimentos, como por exemplo, pescados (ADILAH; HANANI, 2016), produtos cárneos (KONUK TAKMA; KOREL, 2019), lácteos (AHMED *et al.*, 2022), frutas e hortaliças (SHI *et al.*, 2023), entre outros.

Vale salientar que ainda há muita divergência entre as definições de embalagens com atmosfera modificada (EAM) e embalagens ativas. De acordo com Robertson, (2012), apesar da atmosfera modificada também interagir com o alimento e poder ser passiva (a atmosfera muda ao longo do tempo como resultado da atividade bioquímica e microbiológica do alimento) ou ativa (o ar é removido da embalagem ou uma mistura gasosa é admitida imediatamente antes da selagem), uma EAM só pode ser classificada como uma embalagem ativa se em seu *headspace* contiver sachês de eliminação ou emissão de gás (ROBERTSON, 2012). Além disso, a embalagem ativa também foi diferenciada da embalagem inteligente, a qual geralmente

pode complementar a embalagem ativa e tem como papel a comunicação com o consumidor (WYRWA; BARSKA, 2017).

De modo geral, os sistemas de embalagens ativas podem ser divididos em sistemas de eliminação ativa (absorvedores/adsorvedores), quando removem compostos indesejados dos alimentos ou de seu ambiente, por exemplo, umidade, dióxido de carbono, oxigênio, etileno ou odor, e em sistemas de liberação ativa (emissores), se houver adição de compostos aos alimentos embalados ou ao espaço livre, como compostos antimicrobianos, dióxido de carbono, antioxidantes, etileno ou etanol (ROBERTSON, 2012; WYRWA; BARSKA, 2017; YILDIRIM *et al.*, 2018).

De acordo com Janjarasskul e Suppakul, (2017), a geração inicial de embalagens ativas se limitava, normalmente, a sachês eliminadores de oxigênio (O₂), eliminadores e emissores de dióxido de carbono (CO₂) e reguladores de umidade, os quais possibilitavam otimizar e/ou controlar com sucesso as composições de gases atmosféricos e a umidade no *headspace* das embalagens. Já a geração atual apresenta um espectro maior de opções, quanto à tipo, formato, capacidade, taxa de reação e ativação do mecanismo, assim como variadas funções, como por exemplo, controle do gás etileno, emissão de 1-MCP, liberação controlada de agentes antimicrobianos ou antioxidantes e liberação/adsorção de odores (AHMED *et al.*, 2022; FIROUZ; MOHI-ALDEN; OMID, 2021; JANJARASSKUL; SUPPAKUL, 2017; LUCAS-GONZÁLEZ *et al.*, 2023; MOGHADAM *et al.*, 2023; SHI *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2023).

A geração emergente de embalagens ativas ainda ocupa uma pequena fatia do mercado. Não obstante, o número crescente de depósitos e registros de patentes de novas e inovadoras embalagens ativas sugere um futuro promissor para essa nova geração (WYRWA; BARSKA, 2017). Esta nova realidade também pode estar atrelada às crescentes demandas do mercado consumidor pela política *Clean Label*, a qual preconiza o rótulo limpo e a produção de alimentos mais saudáveis e naturais, com redução ou eliminação de ingredientes/aditivos, levando as indústrias processadoras a investirem em sistemas de embalagens ativas como alternativas de conservação sem adição de ingrediente nos alimentos (SINGH *et al.*, 2021).

Muitos dos tipos de sistemas de embalagens ativas, atualmente, já são comercializados nos maiores mercados consumidores do mundo, sendo aqueles eliminadores de oxigênio os mais comercialmente disponíveis. Eles são, geralmente, vendidos como absorventes/adsorventes em forma de sachês individuais ou adesivos contendo os compostos reativos associados ao material de embalagem (AHMED *et al.*, 2022; KUAI *et al.*, 2021). Também existem revestimentos comestíveis já comercializados, como por exemplo, uma startup tailandesa, a *Eden Agritech*, desenvolveu e comercializa um revestimento comestível

antioxidante e antimicrobiano, o “*Naturen™*”, para a preservação de frutas frescas, que pode prolongar sua vida útil em até 3 vezes. O “*Naturen™*” é feito a partir de celulose extraídas de fonte vegetal, ácidos orgânicos e uma combinação de nanopartículas de zinco, cobre e prata (KUAI *et al.*, 2021).

Na literatura, apesar de existirem várias formas de sistemas de embalagens ativas relatados, atualmente os estudos estão se concentrando em grande maioria no desenvolvimento de filmes e revestimentos comestíveis com agentes ativos incorporados e sua aplicação em alimentos (ADILAH; HANANI, 2016; AHMED *et al.*, 2022; KUAI *et al.*, 2021; MARINGGAL *et al.*, 2020; YIN *et al.*, 2023). A técnica de produção de filmes e revestimentos mais comum é o *casting*, cuja preparação consiste na elaboração de uma solução formadora de filme com a adição do composto ativo, seguida de sua secagem em estufa, gerando filmes ou sobre a superfície do produto embalado, resultando no revestimento, podendo também ser comestível (ADILAH; HANANI, 2016; MARINGGAL *et al.*, 2020).

Vale ressaltar também que a natureza ou princípio de funcionamento do material destinado aos sistemas de embalagens ativas depende de seu composto ou substância ativa incorporada, que pode ter propriedades de liberação, absorção, adsorção, bloqueio ou tamponamento (AHMED *et al.*, 2022; YIN *et al.*, 2023). Dentre os compostos ativos, os antioxidantes, em especial os naturais obtidos de extratos vegetais (CUI *et al.*, 2023; KONUK TAKMA; KOREL, 2019; KUAI *et al.*, 2021; LÓPEZ-GÓMEZ; NAVARRO-MARTÍNEZ; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, 2023; SINGH *et al.*, 2021) e os inibidores da ação do etileno, como o 1-metilciclopropeno (1-MCP) (DIAS *et al.*, 2021; NEOH *et al.*, 2017; SHI *et al.*, 2023), são alguns exemplos que vêm sendo utilizados em sistemas de embalagens ativas.

2.3. Extratos vegetais em sistema de embalagens antioxidantes

Sistemas de embalagens ativas antioxidantes são obtidos pela incorporação de agentes antioxidantes e vão agir inibindo ou retardando reações causadas pelo estresse oxidativo, como escurecimento enzimático, oxidação lipídica, redução dos compostos nutricionais dos alimentos, degradação de pigmentos, entre outros. Esses estresses oxidativos podem ser desencadeados pela elevada temperatura, incidência de luz e presença de oxigênio no ambiente em que os alimentos se encontram armazenados ou no *headspace* da embalagem (LOURENÇO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2019; YIN *et al.*, 2023). Enfatiza-se que os agentes antioxidantes podem ser de origem sintética (por exemplo, hidroxianisole butilado – BHA e hidroxitolueno butilado – BHT) ou natural (óleos essenciais e extratos vegetais) (AHMED *et*

al., 2022). Os antioxidantes naturais são os que mais vêm se destacando devido às preferências dos consumidores, sustentabilidade e à política *Clean Label* (SINGH *et al.*, 2021; YIN *et al.*, 2023).

Extratos vegetais são sistemas complexos que contêm compostos bioativos naturais em diferentes concentrações e são, em sua maioria, obtidos a partir de materiais *in natura*, como raízes, caules, folhas, flores, frutos e alabastro) (ARRUDA *et al.*, 2022; MIR *et al.*, 2018). Esses compostos bioativos, oriundos, principalmente, do metabolismo secundário das plantas, podem ser agrupados em três grandes grupos: compostos fenólicos (fenólicos e derivados do ácido cinâmico, ácidos fenólicos, quinonas, flavonas e flavonoides, taninos, cumarinas), terpenos e alcaloides (TAIZ *et al.*, 2017). Dentre esses, o principal grupo e em maior quantidade presente nos extratos vegetais é, geralmente, o dos compostos fenólicos, os quais possuem, quimicamente, anel aromático com um ou mais substituintes hidroxílicos (Figura 2) em sua estrutura, incluindo seus grupos funcionais (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010; TAIZ *et al.*, 2017). As vitaminas C e E, em função de seu alto poder antioxidante, também são consideradas compostos bioativos, embora não sejam oriundas do metabolismo secundário.

Vale salientar que a composição e a qualidade desses extratos são influenciadas pela presença e localização dos grupos funcionais existentes nas estruturas químicas dos compostos e pelo método de extração, dentre inúmeros fatores inerentes à planta, como genótipo, origem geográfica, estágio de desenvolvimento, condições edafoclimáticas e colheita (ARRUDA *et al.*, 2022; BAPTISTA; HORITA; SANT'ANA, 2020; MIR *et al.*, 2018).

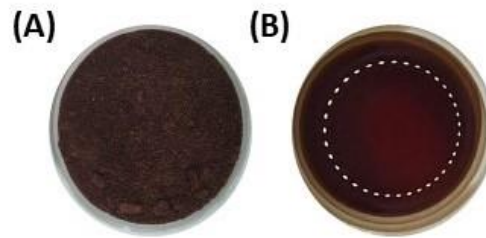
As propriedades antioxidantes dos compostos fenólicos dos extratos vegetais estão associadas à sua capacidade de atuar como agentes doadores de hidrogênio, reduzindo espécies reativas de oxigênio (ERO) em espécies mais estáveis. Outra forma é pelo bloqueio de reações auto oxidativas, por se oxidarem no lugar do produto alvo. Podem agir também promovendo a quelatação de metais de transição e inibição de enzimas pró-oxidantes (ARRUDA *et al.*, 2022; BRENNAN; PAGLIARINI, 2001; LOURENÇO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2019; MIR *et al.*, 2018; YIN *et al.*, 2023). Partindo desse pressuposto, sistemas de embalagens ativas antioxidantes podem ser aplicados em alimentos de duas formas, na primeira a embalagem fica separada dos alimentos, em forma de sachês, podendo inibir a oxidação pela absorção de oxigênio. Já na segunda, cuja aplicação está em crescimento, os compostos antioxidantes são liberados, na maioria das vezes de forma controlada, no alimento ou no *headspace* da embalagem, impedindo ou reduzindo a formação ou propagação de radicais livres e degradação dos compostos de interesses (KUAI *et al.*, 2021).

Grande parte desses compostos presentes nos extratos vegetais são classificados como seguros, pois são dados como substâncias com histórico de uso sem danos (FAO/WHO, 2016), podendo assim, ser incorporados em materiais destinados a sistemas de embalagens ativas. Yin *et al.* (2023) e Arruda *et al.* (2022) relatam, em seus respectivos estudos, que os extratos vegetais por conterem compostos bioativos, com ação antioxidante, vêm sendo fortemente direcionados para desenvolvimento de embalagens ativas de alimentos. Já Huang *et al.* (2019) inferem que esses agentes bioativos naturais são relativamente seguros e fáceis de obter, podendo ser incorporados em filmes ou revestimentos de alimentos (por exemplo, cobertura comestível ativa).

De acordo com Manzoor *et al.* (2023) a senescência, um processo natural em produtos agrícolas, pode ser retardada pelo revestimento de frutas e hortaliças frescos com a utilização de revestimentos contendo extratos vegetais (MANZOOR *et al.*, 2023). Diversos pesquisadores têm se dedicado à aplicação de extratos vegetais em filmes ou revestimentos ativos. Extratos de pétala de açafreão (HASHEMI; JAFARPOUR, 2020), de sálvia, de alecrim (KAHYA *et al.*, 2022), de chá verde (PENG; WU; LI, 2013), de cenoura roxa (AKHTAR *et al.*, 2012), de framboesa (WANG *et al.*, 2012) são alguns exemplos que já foram estudados considerando sua incorporação em filmes e revestimentos ativos, assim como, aplicados em vários tipos de alimentos (AHMED *et al.*, 2022; ARRUDA *et al.*, 2022; LOURENÇO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2019; MIR *et al.*, 2018).

Um exemplo de matéria prima vegetal convencional amplamente usada e que tem atraído a atenção de diversos setores da indústria (por exemplo, alimentos e cosméticos), é a polpa do fruto do açazeiro (Figura 2 A), originário da floresta amazônica brasileira, a qual apresenta em sua constituição grande quantidade e variedade de compostos bioativos que podem ser extraídos (Figura 2 B) e, possivelmente, aplicados em revestimentos ativos antioxidantes (CAMARGO NEVES *et al.*, 2022). Melo *et al.* (2016) e Rossetto *et al.* (2020), por exemplo, determinaram que a farinha da polpa do açaí apresenta alta capacidade antioxidante e uma diversidade de compostos fenólicos, como a quercetina, cianidina, rutinosídeo, catequina, procianidinas, ácido p-hidroxibenzóico, ácido vanílico, ácido cumárico e resveratrol.

Figura 2 – Farinha (A) e extrato aquoso (B) da polpa de açaí liofilizada.

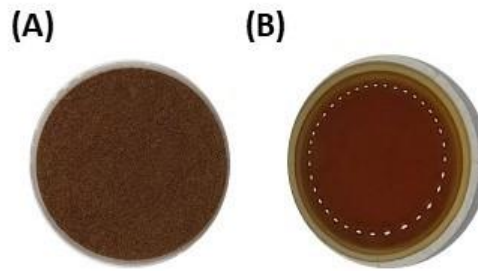


Fonte: Da autora (2023).

No entanto, atualmente, é crescente a procura por outras fontes promissoras de compostos bioativos na indústria alimentícia, como os resíduos agroalimentares (folhas, galhos, cascas, raízes, caules e sementes), levando em consideração que são matérias primas de baixo ou nenhum custo e que muitas das vezes são desvalorizadas, descartadas e consideradas como um problema ambiental de âmbito mundial (ARRUDA *et al.*, 2022). Esses resíduos, se bem explorados, podem se tornar fontes de geração de renda, como subprodutos e coprodutos agroindustriais. Lourenço *et al.* (2019) relatam que extratos obtidos a partir de coprodutos e subprodutos vegetais agroindustriais tem apresentado grande potencial antioxidante para serem incorporados em materiais de embalagem, com resultados promissores, e seu uso vem ao encontro das políticas sustentáveis do reaproveitamento. Extratos da casca de pitaya vermelha (QIN *et al.*, 2020), das cascas de romã (LIU *et al.*, 2020), de semente de toranja (RIahi *et al.*, 2021) e do caroço de manga (MARYAM ADILAH; JAMILAH; NUR HANANI, 2018) são alguns exemplos de extratos obtidos a partir de resíduos agroindustriais que já foram incorporados em filmes e revestimentos ativos como fontes de compostos bioativos.

Espera-se que os filmes incorporados com essas substâncias também possam ser apresentados como materiais ecologicamente corretos e sustentáveis (ARRUDA *et al.*, 2022). As cascas da amêndoa do cacau, também conhecida como farelo de cacau (Figura 3 A), é um coproduto oriundo de produtos à base de chocolate (OKIYAMA; NAVARRO; RODRIGUES, 2017), passível de ser usada para extração de compostos bioativos (Figura 3 B). Rebollo-Hernanz *et al.* (2019) inferem que os compostos fenólicos do farelo de cacau apresentam grande potencial antioxidante comprovado; ao estudarem o perfil fenólico desse produto, Rebollo-Hernanz *et al.* (2021) identificaram, como majoritários, ácido protocatecuico, seguido por epicatequina, procianidina B1 e B2 e catequina, além de outros compostos em menores concentrações, como o ácido cafeico, quercetin-3-*O*-galactoside, ácido ferúlico, ácido gálico, entre outros.

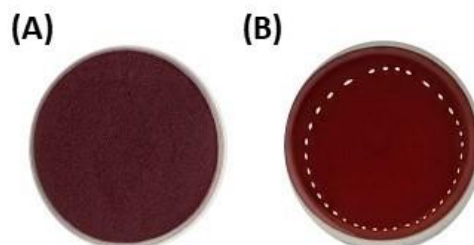
Figura 3 – Farinha (A) e extrato aquoso (B) do farelo de cacau.



Fonte: Da autora (2023).

Outra fonte alternativa para a obtenção de extratos com compostos bioativos (Figura 4 B) são as cascas de jabuticaba (Figura 4 A). A jabuticaba é um fruto da espécie *Myrciaria cauliflora*, família Myrtaceae, nativa do Brasil. Os frutos são consumidos *in natura* ou processados, normalmente utilizados na fabricação de licores, geleias e sucos. Entretanto, suas cascas são, geralmente, descartadas, sendo consideradas resíduos da agroindústria. A jabuticaba entrou, recentemente, no rol das chamadas superfrutas, devido à sua composição e aos seus relevantes efeitos promotores da saúde, com destaque para suas cascas, com fortes efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios (CHANG; ALASALVAR; SHAHIDI, 2019; QUATRIN *et al.*, 2019). Segundo Quatrin *et al.* (2019), por exemplo, as cascas das jabuticabas, assim como seu extrato, apresentam uma grande diversidade e altos teores de compostos fenólicos livres e ligados à sua matriz, sendo encontrados majoritariamente a trigaloilglicose, tetragaloilglicose, cianidina 3-glicosídeo, delfinidina 3-glicosídeo, monogaloilglicose, nigaloilglicose, trigaloilglicose, tetragaloilglicose, ácido 3-O-galloilquínico, miricetina-hexosídeo, quercetina-hexosídeo, quercetina-pentosídeo, castalina, trisgalloil HHDP-glicose, galloil -castalagina.

Figura 4 – Farinha (A) e extrato aquoso (B) da casca de jabuticaba.

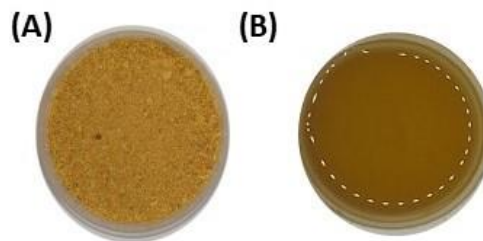


Fonte: Da autora (2023).

Outro exemplo passível de ser utilizado é o resíduo do processamento mínimo de cenouras (cascas e talos). Embora pouco estudado, tem grande potencial a ser explorado por ser

oriundo do processamento de uma hortaliça de alto valor nutricional, rica em compostos bioativos (ALASALVAR *et al.*, 2001). As Figuras 5 (A) e (B) ilustram a farinha e o extrato aquoso dos resíduos do processamento mínimo de cenouras, respectivamente. As cenouras estão entre as hortaliças mais importantes do mundo e a sua produção mundial anual supera 40 milhões de toneladas (PAPOUTSIS; EDELENBOS, 2021), sendo parte destinada ao processamento mínimo. Logo, há uma grande geração de resíduos que apresentam potencialidade a obtenção de compostos bioativos. Alasalvar *et al.* (2001), ao estudarem a composição de compostos fenólicos em diversas variedades de cenouras, observaram nas cenouras laranjas, incluindo suas cascas e talos, a presença, majoritariamente, de ácido 5'-cafeoilquínico, ácido 3',4'-dicafeoilquínico e ácido 3',5'-dicafeoilquínico, mas também identificaram em menor quantidade o ácido 3'-cafeoilquínico, 3'-p-ácido cumaroilquínico, 3'-ácido feruloquínico, entre outros.

Figura 5 – Farinha (A) e extrato aquoso (B) dos resíduos do processamento mínimo de cenouras.



Fonte: Da autora (2023).

2.4. 1-Metilciclopropeno (1-MCP) em sistema de embalagens ativas

O etileno é o principal fitormônio gasoso associado aos fenômenos de amadurecimento e é responsável por coordenar a expressão oportuna de genes que codificam uma variedade de processos de amadurecimento e senescência de frutas, como aumento da respiração, produção autocatalítica de etileno e mudanças na cor, textura, aroma e sabor (BLANKENSHIP; DOLE, 2003; DIAS *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2017). Dessa forma, a descoberta de que o gás 1-metilciclopropeno (1-MCP) age bloqueando a ação do etileno por meio da ligação competitiva aos receptores, representou um avanço significativo no controle dos efeitos colaterais do etileno; ele atua, efetivamente, na manutenção da qualidade e prolongamento da vida útil pós-colheita de frutas, principalmente as climatéricas, como maçã, abacate, banana,

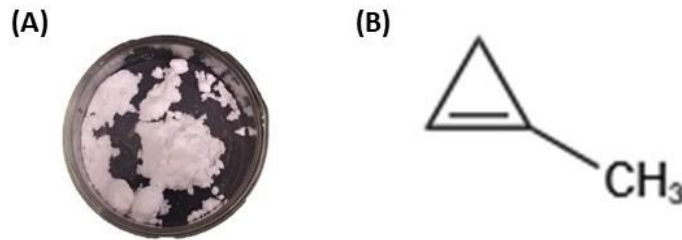
tomate, entre outras (BLANKENSHIP; DOLE, 2003; DIAS *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2017).

Os receptores de etileno são codificados por uma família multigênica (em *Arabidopsis*, ETR1, ETR2, ERS1, ERS2 e EIN4) que podem ser, com base nos resíduos conservados da sua histidina quinase, divididos em duas subfamílias. Os receptores de etileno estão localizados na membrana do retículo endoplasmático e interagem com duas proteínas de sinalização a jusante, CTR1 (CONSTITUTIVE TRIPLE RESPONSE) e EIN2 (ETHYLENE-INSENSITIVE2) (MATA *et al.*, 2018). De acordo com Dias *et al.* (2021) e Blankenship e Dole, (2003), quando o 1-MCP se liga, permanentemente, aos receptores, a expressão desses genes relacionados à sinalização de etileno é suprimida, reduzindo o número de receptores livres, ocasionando o impedimento da ligação e ação do etileno. Ni *et al.* (2021) também relatam que 1-MCP destrói a transdução do sinal de etileno e inibe a síntese de etileno ligando-se ao metal receptor com sua própria ligação dupla. Sendo ainda relatado por Blankenship e Dole (2003), que a afinidade do 1-MCP pelos receptores é dez vezes maior que a do etileno, tornando o 1-MCP mais ativo em concentrações muito mais baixas do que o etileno.

Vale ressaltar que devido ao surgimento de novos receptores do etileno, que vão sendo sintetizados com o passar do tempo, o período de ação do 1-MCP é limitado e o fruto volta a amadurecer normalmente. Além disso, a concentração aplicada, tempo e temperatura de exposição, espécie, cultivar e grau de maturidade do fruto são variáveis que vão interferir na ação do 1-MCP. Destaca-se, que em quantidade excessiva, o 1-MCP pode causar desordens fisiológicas e o amadurecimento irregular dos frutos. Sendo assim, torna-se necessária a adoção de protocolos de aplicação do 1-MCP otimizados e específicos para cada tipo de fruto, respeitando-se seu estágio de maturação (BLANKENSHIP; DOLE, 2003; DIAS *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2020; MATA *et al.*, 2018; NI *et al.*, 2021).

De acordo com Rademacher, (2015), o uso do 1-MCP como produto alimentício só foi aprovado em 2001 e em 2004 foi registrado pela *Food and Drug Administration* (FDA) como um ingrediente ativo seguro; atualmente, os produtos *SmartFresh*TM (Figura 6 A) e *EthylBlock*TM e *Fysium*® são os mais utilizados comercialmente (DIAS *et al.*, 2021; RADEMACHER, 2015). Na literatura, tem sido amplamente reportado que o tratamento pós-colheita com 1-MCP pode efetivamente retardar o processo de amadurecimento e senescência dos frutos e prolongar sua vida útil (BLANKENSHIP; DOLE, 2003; DIAS *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2020; MATA *et al.*, 2018; RADEMACHER, 2015; ZHANG *et al.*, 2017).

Figura 6 – 1-Metilciclopropeno (1-MCP), (A) composto em pó (SmartFresh™) e a (B) estrutura química.



Fonte: Da autora (2023).

O 1-MCP é um gás e, quimicamente, apresenta um anel formado por três átomos de carbono (C), com um grupo metil na posição C1 (Figura 6 B). Ele é considerado seguro, sob a perspectiva animal e ambiental, não deixando resíduos nocivos, quando utilizado em alimentos (DIAS *et al.*, 2021; NEOH *et al.*, 2017; RADEMACHER, 2015). Levando-se em consideração a difícil manipulação de gases, a hidrofobicidade do 1-MCP e visando a facilidade de aplicação, normalmente, realiza-se uma complexação de inclusão do 1-MCP com a α -ciclodextrina (α -CD), oligossacarídeo cíclico com cavidade interna relativamente hidrofóbica e exterior hidrofílico, o que possibilita envolver internamente compostos hidrofóbicos, como 1-MCP, e manter externamente sua afinidade com a água. Logo, essa complexação estabiliza e transforma o 1-MCP gasoso altamente reativo em forma de pó (Figura 6 A) (BLANKENSHIP; DOLE, 2003; NEOH *et al.*, 2017).

De acordo com Neoh *et al.* (2010), temperatura e umidade são os dois principais fatores extrínsecos que influenciam a estabilidade de armazenamento de um complexo de inclusão e a interação da água com materiais em pó é um fator importante no desempenho do produto. Devido a isso, a forma de aplicação mais utilizada na conservação pós-colheita é pela preparação do 1-MCP em pó em soluções aquosas, em um ambiente fechado, havendo sua liberação em forma de gás, embora existam dificuldades devido à baixa solubilidade do 1-MCP (BLANKENSHIP; DOLE, 2003; DIAS *et al.*, 2021).

Em contrapartida, levando-se em consideração que o aumento da umidade relativa induz a dissociação do complexo 1-MCP/ α -CD e que no *headspace* das embalagens o teor de umidade é elevado devido às reações metabólicas que continuam acontecendo nos vegetais (NEOH *et al.*, 2010, 2017), Neoh *et al.* (2017) sugerem que a forma de aplicação tradicional de 1-MCP seja substituída por embalagens ativas de liberação do gás, visando uma aplicação contínua no produto-alvo, mesmo em trânsito, que contribua em termos de economia, tempo e qualidade do alimento. Os autores ainda ressaltam que as estratégias relacionadas à proteção contra os efeitos prejudiciais do etileno incluem evitar, remover e inibir compostos indesejáveis no interior das

embalagens de frutas e hortaliças. Ariyanto e Yoshii (2021) também relatam que apesar dos benefícios, ainda há poucos estudos sobre o comportamento de liberação do 1-MCP do pó do complexo de inclusão e o desenvolvimento de embalagens de liberação controlada contendo 1-MCP

Wu *et al.* (2021), por exemplo, ao desenvolverem um filme biodegradável multicamada de polissacarídeo incorporado com 1-MCP em pó, constataram a liberação do gás, a 20°C, com o ajuste da umidade entre 50 e 100%, em embalagens utilizadas para acondicionar cogumelos (*Agaricus bisporus*). Dessa forma, concluíram que esse sistema de embalagem ativa teve efeitos positivos na manutenção da qualidade pós-colheita de cogumelos, retardando o amolecimento, escurecimento e a perda de massa, assim como inibindo a atividade das enzimas relacionadas à síntese de etileno.

Ortiz *et al.* (2013) desenvolveram filmes ativos biodegradáveis, à base de proteínas de soja, com a incorporação de 1-MCP, e os aplicaram como sachês em embalagens para manter a qualidade pós-colheita e prolongar a vida útil de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) à 10 °C com umidade entre 85 e 90 %. Os autores concluíram que os sachês retardaram o amaciamento dos tomates e podem ser úteis na utilização em sistemas de embalagens ativas na pós-colheita de frutos (ORTIZ; MAURI; VICENTE, 2013).

No estudo realizado por Ariyanto *et al.* (2019), um papel foi revestido com soluções de goma-laca contendo 1-MCP em pó e aplicado como um sachê em embalagens de poliestireno expandido. Maçãs Fuji foram acondicionadas nessas embalagens e armazenadas à 4 °C por 15 dias, sendo, posteriormente, transferidas para uma temperatura de 20 °C onde foram mantidas por mais 15 dias, com umidades aumentadas gradualmente (20, 40, 50, 60 e 80%). Com isso, os autores concluíram que a condição de maior umidade (80% UR) resultou na maior liberação de 1-MCP e que aplicação do papel revestido com 1-MCP no sistema de embalagem ativa manteve a qualidade dos frutos, assim como, inibiu a produção de etileno e aumentou a vida útil da maçã (ARIYANTO *et al.*, 2019).

Já Neoh *et al.* (2017) objetivaram investigar a metodologia de incorporação do 1-MCP em pó em nanofibras eletrofiadas de poliestireno (PS), assim como estudar os perfis de liberação controlada do gás 1-MCP da fibra ativa sob umidade linearmente aumentada (0 a 100%), sob diferentes temperaturas (30, 40 e 50 °C). Dessa forma, os autores constataram que as nanofibras de PS desenvolvidas mostraram perfis de liberação de 1-MCP responsivos à umidade de armazenamento, sendo mais expressivos em maiores temperaturas. Além disso, também concluíram que nanofibras poliméricas contendo o 1-MCP podem ser aplicadas em

sistemas de embalagens com liberação contínua e controlada do 1-MCP, para retardar o amadurecimento de frutas climatéricas (NEOH *et al.*, 2017).

2.5. Nanotecnologia e o setor de embalagens para alimentos

A palavra “nano” em termos simples significa algo pequeno, minúsculo e atômico por natureza e sua aplicação na ciência levou a um campo chamado Nanotecnologia (HAMAD *et al.*, 2018). Uma ciência multidisciplinar, que combina engenharia, biotecnologia e tecnologia de processamento industrial e abrange a faixa de tamanho em nanoescala de materiais que fica entre 1 e 100 nanômetros (nm), englobando os pontos quânticos, com zero dimensão (0D) e nanomateriais com uma (1D), duas (2D) ou três (3D) dimensões na escala nanométrica, assim como nano-objetos, produzidos intencionalmente para fins comerciais, tendo em vista que apresentam propriedades ou composição específicas derivadas da nanoescala (FRANCISCO; GARCÍA-ESTEPA, 2018; OLAWOYIN, 2018).

Os materiais, em nível de nanoescala, são caracterizados por diferentes propriedades físicas e químicas, levando em consideração que a forma da superfície de uma nanoestrutura também influencia em suas propriedades (LIU *et al.*, 2011). Em outras palavras, a área superficial dos nanomateriais aumenta com a diminuição do seu tamanho, levando a exibirem propriedades ópticas, elétricas, magnéticas, mecânicas, bioativas, entre outras, diferentes daquelas exibidas por materiais em escala microscópica (CLUNAN; RODINE-HARDY, 2014; LIU; ZHANG; BHANDARI, 2019; LIU *et al.*, 2011; MOHMOOD *et al.*, 2013; WARNER *et al.*, 2010). Por este motivo, Liu *et al.* (2019) concluíram que as características únicas dos nanomateriais, devido ao seu tamanho reduzido, são importantes determinantes de sua aplicação na conservação de frutas e hortaliças. Ademais, Pérez-Esteve *et al.* (2022) inferiram que a nanotecnologia permite obter embalagens biodegradáveis com melhores propriedades mecânicas e de barreira aprimoradas, embalagens ativas com compostos antioxidantes e antimicrobianos nanométricos e embalagens inteligentes.

Dessa forma, a conquista da liderança tecnológica em nanotecnologia é frequentemente vista como um imperativo para a competitividade global do século XXI, tendo em vista que suas aplicações estão por toda parte, englobando avanços no setor de processamento e embalagem de alimentos (FIROUZ; MOHI-ALDEN; OMID, 2021; HE; DENG; HWANG, 2019; LIU; ZHANG; BHANDARI, 2019; NILE *et al.*, 2020; PÉREZ-ESTEVE *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2023). A empresa de pesquisa *Reports and Data* (New York, Estados Unidos), em seu relatório de pesquisa de mercado, estimou que a receita do mercado de embalagens ativas

habilitadas para nano nos Estados Unidos chegará a US\$ 99,68 bilhões em 2027 e atribuem esse crescimento do mercado às indústrias farmacêuticas e as regulamentações de segurança alimentar introduzidas pelos governos de todo o mundo. Também citam *BASF SE*, *Amtcor Limited*, *Sonoco Products Co.*, *Honeywell International Inc.*, *Bemis Company Inc.*, *Avery Dennison*, *Tetra Pak International SA* e *DuPont Teijin Films* como sendo algumas das empresas mundiais que têm empreendido uma série de estratégias neste setor de embalagens para alimentos (REPORTS AND DATA, 2020).

Estudos recentes comprovam que a aplicação de nanomateriais, como por exemplo, nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono, nanocápsulas e nanofibras poliméricas, foram eficazes na conservação de vários alimentos, assim como no retardo dos processos de senescência, de crescimento microbiológico e de reações oxidativas e enzimáticas, colaborando para o aumento da vida útil pós-colheita de diversas frutas e hortaliças (BISWAS *et al.*, 2022; KRAŚNIEWSKA; GALUS; GNIEWOSZ, 2020; LIU; ZHANG; BHANDARI, 2019; NILE *et al.*, 2020; PÉREZ-ESTEVE *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2023). Dentre esses, as nanofibras poliméricas, atualmente, despertam ampla atenção e são consideradas candidatas ideais para aplicações na indústria de alimentos, como em sistemas de embalagens ou revestimentos ativos (GUGULOTHU *et al.*, 2018; IBRAHIM; KLINGNER, 2020; MIN *et al.*, 2022; NEOH *et al.*, 2017; SHI *et al.*, 2023).

2.5.1. Nanofibras poliméricas

As nanofibras surgiram como nanomateriais unidimensionais (1D) para uma ampla gama de pesquisas e aplicações comerciais, as quais apresentam várias características interessantes. Elas possuem diâmetros 1000 vezes menor que o do cabelo humano, alta área superficial com porosidade ajustável, topografia 3D, funcionalidades flexíveis da superfície e melhores propriedades mecânicas (rigidez e resistência à tração) que qualquer outro material comumente usado (GUGULOTHU *et al.*, 2018; HUANG *et al.*, 2003). Além disso, o diâmetro da nanofibra deve ser uniforme ao longo de todo comprimento, assim como sua superfície deve ser contínua, livre de defeitos ou com seus defeitos controlados (DA SILVA PARIZE *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Diferentes polímeros naturais e sintéticos podem ser usados para a produção de nanofibras poliméricas, como zeína, gelatina, poli (ϵ -caprolactona), poli (ácido láctico), poli (álcool vinílico) e poli (óxido de etileno), as quais podem ser reforçadas com ampla gama de compostos químicos e bioativos (sintéticos ou naturais), metais e óxidos metálicos, entre outros

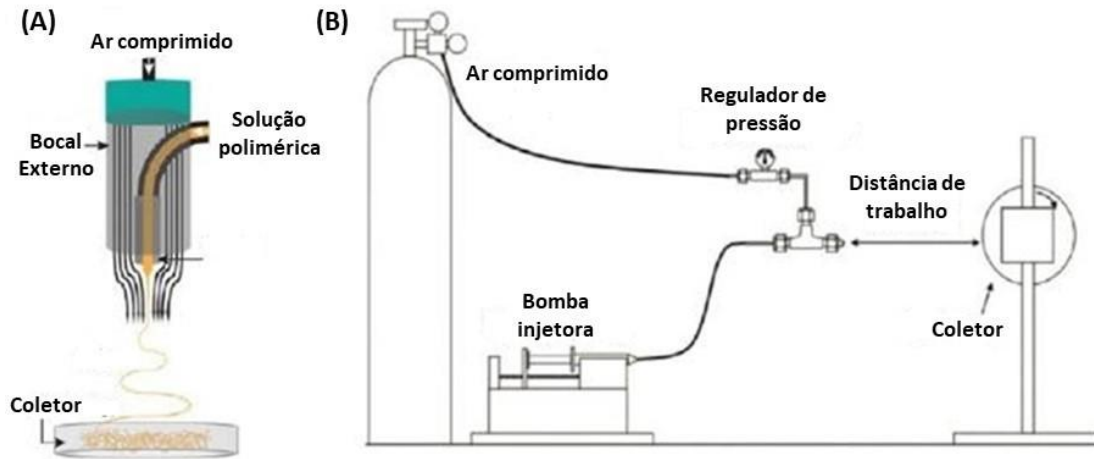
(SHI *et al.*, 2023; YOO; KIM; PARK, 2009). Assim, a larga disponibilidade de matéria-prima impacta, positivamente, no avanço deste setor. Outro ponto positivo é o potencial de modificação da superfície da nanofibra e de suas estruturas, o que permite alterar suas funcionalidades, levando a diferentes propriedades físicas e possíveis aplicações (LI; MCCANN; XIA, 2004; SHI *et al.*, 2023; YOO; KIM; PARK, 2009)

Várias técnicas de fabricação de nanofibras poliméricas foram relatadas na literatura sob diferentes nomes e classificações, sendo que as técnicas de eletrofiação (*electrospinning*), fiação por fusão (*melt spinning*), e fiação por sopro (*melt blowing*) são algumas das mais aplicadas para a produção atualmente. Dentre elas, a eletrofiação é a mais utilizada para a fabricação de fibras na escala nanométrica, denominadas nanofibras (BARHOUM *et al.*, 2019; ELLISON *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2017; SHI *et al.*, 2023). Entretanto, algumas desvantagens se associam à técnica convencional de eletrofiação, tais como, baixa taxa de produção, necessidade de altas tensões e de um coletor condutivo (LIU *et al.*, 2017). Em contrapartida, a técnica fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) é uma alternativa, tendo em vista que não necessita de uso de campo elétrico, é de baixo custo e de alta taxa de produtividade, cerca de, pelo menos, 100 vezes mais rápida que na eletrofiação (BARHOUM *et al.*, 2019).

2.5.2. Fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS)

A técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) foi desenvolvida e patenteada em projeto realizado em parceria entre a Embrapa Instrumentação e o *United States Department of Agriculture* (USDA) para produção de micro e nanofibras a partir de soluções poliméricas num processo que combina os princípios da fiação por sopro (*melt blowing*) e eletrofiação (*electrospinning*) (DA SILVA PARIZE *et al.*, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2009). Essa técnica envolve o uso de um bico interno especializado, por onde passa a solução polimérica bombeada, e um bico concêntrico externo que fornece o ar pressurizado, como esquematizado na Figura 7 (A). A geometria do bico externo cria uma região de baixa pressão ao redor do bico interno, que auxilia a formação de um cone pela solução polimérica. Quando a força motriz gerada pelo ar supera a tensão superficial, a solução é lançada em direção ao coletor rotacional com velocidade controlada e conhecida, localizado a uma distância pré-determinada. Durante o lançamento da solução, o solvente do fluxo do jato é evaporado, criando uma estrutura de fibra sólida (DA SILVA PARIZE *et al.*, 2016). Na Figura 7 (B), encontra-se o esquema tradicional da estrutura necessária para realização da técnica de SBS.

Figura 7 – Técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS), esquemas (A) dos bicos e (B) da configuração tradicional.



Fonte: Adaptado de Daristotle *et al.* (2016).

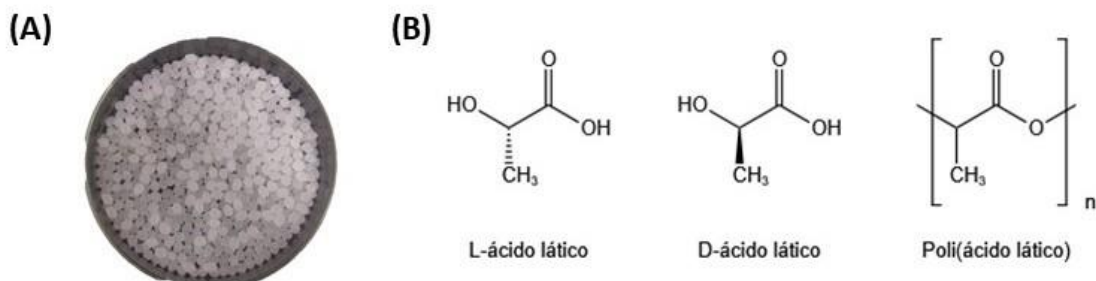
Diversos parâmetros podem influenciar a obtenção das nanofibras a partir de soluções poliméricas. Estes parâmetros podem ser divididos em três classes: propriedades da solução (concentração, viscosidade e tensão superficial), condições ambientes (umidade e temperatura) e variáveis de processo (taxa de alimentação da solução, distância entre o bico e o coletor - distância de trabalho, pressão do ar comprimido, entre outros) (DA SILVA PARIZE *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2011). Outro parâmetro importante a ser considerado na fiação tradicional por SBS, assim como na escolha correta do polímero ideal, é a utilização de um solvente altamente volátil, como clorofórmio, ácido acético, tolueno, acetona, entre outros, tendo em vista que um dos princípios do estiramento das fibras é pela evaporação do solvente enquanto o ar comprimido arrasta a solução polimérica, momento em que a força de arraste proveniente do ar comprimido encontra-se superior a tensão superficial (DADOL *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2016).

A necessidade da utilização de solventes voláteis é, atualmente, um fator limitante e passível de ser explorado, para que haja o desenvolvimento e o crescimento da aplicação de nanofibras poliméricas por meio da fiação por SBS. Partindo desse pressuposto, poucos trabalhos foram realizados utilizando água como solvente na fiação por SBS, tendo em vista que a água, por ser um solvente com volatilidade extremamente baixa, pode dificultar, ou mesmo impedir, o estiramento das fibras (SANTOS *et al.*, 2016). Desse modo, adaptações nos parâmetros de produção e no equipamento podem auxiliar no processo de fiação de soluções poliméricas aquosas pela técnica SBS.

2.5.3. Poli (ácido lático) (PLA)

O poli (ácido lático) (PLA) (Figura 8 A), um poliéster alifático linear, é um biopolímero termoplástico cuja produção se dá a partir de recursos renováveis, como a dextrose do milho, melação de cana-de-açúcar e fécula de batata inglesa (CARRASCO *et al.*, 2010; GARLOTTA, 2001; GUPTA; REVAGADE; HILBORN, 2007). Os monômeros de ácido lático ($C_3H_6O_2$), precursores na produção de PLA, são moléculas enantioméricas com dois isômeros, os L- e D-ácido lático (Figura 8 B), sendo o isômero L-ácido lático o constituinte majoritário do PLA derivado de fontes renováveis (CARRASCO *et al.*, 2010; LIM; AURAS; RUBINO, 2008). Além disso, precursores na produção de PLA podem ser obtidos por meio da síntese química do acetaldeído ou pela fermentação de carboidratos (CARRASCO *et al.*, 2010; DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021; KLOTZ *et al.*, 2016; LIM; AURAS; RUBINO, 2008). Atualmente, a maior parte da produção de ácido lático é baseada na rota fermentativa (DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

Figura 8 – Poli (ácido lático) (PLA), (A) *pellets* e (B) estruturas químicas genérica e de seus isômeros (L- e D-ácido lático)



Fonte: Da autora (2023).

O PLA teve sua primeira produção relatada em 1932, mas a capacidade de se obter monômeros de forma econômica, a partir de matérias-primas renováveis, garantiu a esse polímero um lugar consolidado na indústria de plásticos biodegradáveis (DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021; FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016; LUNT, 1998). De acordo com Carrasco *et al.* (2010), a fermentação de d-glicose de milho ou de outros substratos de biomassa permite a produção de ácido lático a um preço consideravelmente mais barato do que a forma de obtenção utilizada até então, a partir de produtos derivados de petroquímicos. Apesar de existirem os polímeros poli (L-lático) (PLLA), poli (D-ácido lático) (PDLA) e poli (D,L-ácido lático) (PDLLA), somente PLLA e PDLLA são encontrados comercialmente

(ALBUQUERQUE; RAMOS; MELO, 2012; CARRASCO *et al.*, 2010; FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016).

A proporção, ou seja, a pureza óptica de cada isômero (L- e D-ácido láctico) influencia diretamente as propriedades dos PLAs, como temperatura de fusão e cristalinidade (CARRASCO *et al.*, 2010; KLOTZ *et al.*, 2016). Por exemplo, um PLA extremamente cristalino pode ser obtido a partir de L- ou D-ácido láctico opticamente puro, em contraposição à sua mistura racêmica (D,L-ácido láctico) (DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021). Em outras palavras, quando o PLA é composto majoritariamente ($\geq 90\%$ de sua composição) por um dos isômeros (L- ou D-ácido láctico) tende a ser cristalino, como o PLLA e PDLA, já quando apresenta menor pureza óptica, tende a ser mais amorfo, a exemplo do PDLLA (AURAS *et al.*, 2010; DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

A temperatura de fusão (T_m) e a temperatura de transição vítrea (T_g) do PLA vão diminuir com a redução das quantidades do isômero L-ácido láctico, fato que também vai interferir nas características físicas, como densidade, capacidade térmica e propriedades mecânicas e reológicas, tendo em vista que elas dependem da T_g do PLA. Dessa forma, com a porcentagem de cristalização podendo variar entre 10 e 70%, as T_g e T_m do PLA também podem variar de 50 a 80 °C e 130 a 180 °C, respectivamente, e com massa molar indo de 2.000 a 300.000 g.mol⁻¹, resultam em polímeros com uma larga escala de valores de dureza e de rigidez, e, conseqüentemente, levando à uma gama de possibilidades de aplicações (AURAS *et al.*, 2010; DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

Esse polímero também exhibe muitas propriedades interessantes, como termoplasticidade, barreira a gases, resistência aos raios UV, elasticidade, rigidez, hidrofobicidade, biocompatibilidade e boa capacidade de moldagem (CARRASCO *et al.*, 2010; DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021). Além disso, devido ao fato dos PLAs pertencerem à família dos poliésteres alifáticos, os quais contêm ligações éster flexíveis, podem se degradar sob uma ampla faixa de pH, dando origem a polímeros atóxicos e facilmente decompostos termicamente por hidrólise (CHENG *et al.*, 2009; GUPTA; REVAGADE; HILBORN, 2007). Segundo Tawakkal *et al.* (2014), a *Food and Drug Administration* (FDA) reconheceu o PLA como seguro, aprovando seu uso em embalagens de alimentos, incluindo aplicações de contato direto.

O PLA surge como um produto promissor sob o conceito de “plástico verde”, uma vez que esse polímero tem sido aplicado nos mais diversos ramos industriais, como na indústria alimentícia e automobilística e pode ser processado por extrusão, moldagem por injeção, moldagem por sopro ou fiação de fibras em diversos produtos, da mesma forma que outros polímeros termoplásticos (DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2021). De acordo com Lim *et al.*

(2008), o PLA tem propriedades ópticas, físicas, mecânicas e de barreira melhores em comparação com os polímeros à base de petróleo existentes, perdendo apenas na resistência térmica. Dessa forma, quando as aplicações permitem o uso do PLA, ele apresenta algumas vantagens, sendo uma alternativa aos polímeros convencionais utilizados como materiais para embalagens, geralmente não biodegradáveis ou não recicláveis, como polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS) (CARRASCO *et al.*, 2010; GARLOTTA, 2001)

Uma ilustração de nanofibras de PLA obtidas a partir da técnica de fiação SBS é apresentada na Figura 9. Azerêdo e Marconcini, (2021) produziram soluções poliméricas de PLA em diclorometano nas concentrações de 10 e 16% (p/v) e obtiveram com sucesso nanofibras de PLA por SBS, com diferentes morfologias e propriedades. Os autores relataram que a concentração da solução polimérica utilizada na fiação influenciou nos diâmetros das fibras das mantas obtidas, indicando que, nesse caso, a concentração menor (10%) determinou diâmetros de fibra menores do que nas mantas produzidas a partir de uma concentração maior (16%). Também concluíram que os diâmetros encontrados também influenciaram nos diferentes desempenhos das mantas nanoestruturadas nos testes de filtração de líquidos (AZERÊDO; MARCONCINI, 2021).

Figura 9 – Nanofibras poliméricas de poli (ácido lático) (PLA) fiadas por SBS



Fonte: Da autora (2023).

Miranda *et al.* (2021) comprovaram a viabilidade de aplicação de nanofibras de PLA como sachês em sistemas de embalagens ativas destinadas à conservação pós-colheita de frutas climatéricas. Para isso, os autores produziram nanofibras de PLA a partir da fiação por SBS de uma solução de PLA (15% p/v) em uma mistura de clorofórmio e acetona (3:1). As mantas nanoestruturadas de PLA obtidas foram utilizadas como um pacote (sachê) de armazenamento de uma pastilha de parafina com permanganato de potássio (KMnO₄), um reconhecido extintor de etileno. Ao aplicarem o sachê em um sistema de embalagem ativa, os autores concluíram

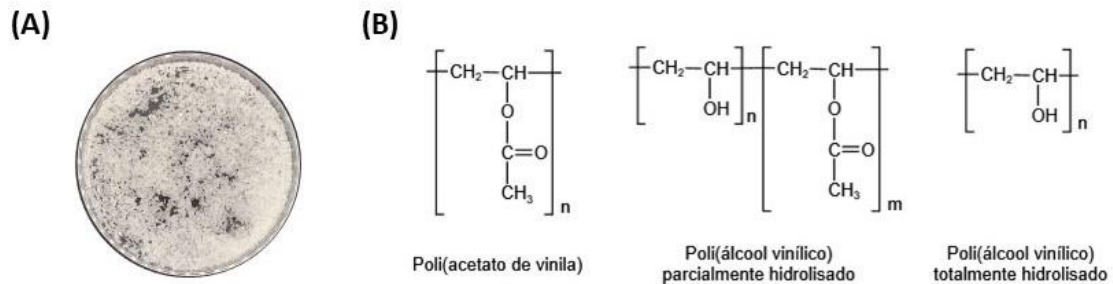
que o sachê desenvolvido foi capaz de absorver o etileno, assim como a umidade presente no *headspace* da embalagem, retardando os processos de amadurecimento e senescência e aumentando a vida útil de tomate (*Lycopersicon esculentum* M.) (MIRANDA *et al.*, 2021).

Já Brandão *et al.* (2023) comprovaram a eficácia de se incorporar compostos ativos em nanofibras de PLA aplicadas em sistemas de embalagem ativa com liberação controlada de composto voláteis destinadas à conservação pós-colheita de frutas. Nesse estudo, soluções poliméricas de PLA em clorofórmio a uma concentração de 12% (p/v), contendo óleos essenciais, foram fiadas por meio do SBS. As embalagens contendo óleos essenciais de *Ocimum gratissimum* L. e *Ocimum basilicum* L. encapsulados nas nanofibras de PLA foram utilizadas para armazenar de uvas de mesa (*Vitis labrusca* 'Niagara'), o que permitiu comprovar que esse sistema foi capaz de liberar compostos voláteis, assim como retardar a contaminação fúngica e a produção de ocratoxina nos frutos. Com isso, os autores concluíram que as nanofibras de PLA contendo os óleos essenciais têm potencial e podem ser adequadas para aplicação em frutas, visto que possibilitaram a manutenção da qualidade e prolongamento do tempo de armazenamento das uvas (BRANDÃO *et al.*, 2023).

2.5.4. Poli (álcool vinílico) (PVA)

O poli (álcool vinílico) (PVA) (Figura 10 A) é um polímero sintético linear e semicristalino que consiste em uma cadeia de carbono, como estrutura principal, e um grupo funcional hidroxila (OH) (VATANPOUR *et al.*, 2023). Esse polímero é obtido por meio do processo de hidrólise do poli (acetato de vinila), onde o grupo éster (R-COO-R), existente na estrutura do acetato de vinila precursor, é completamente ou incompletamente substituído por grupos OH (Figura 10 B). Dessa forma, o PVA pode ser classificado em dois grupos, parcialmente (cerca de 87 a 89% mol de grupos acetato foram substituídos por grupos OH) e totalmente hidrolisado (acima de 98% mol de grupos acetato foram substituídos por grupos OH) (OUN *et al.*, 2022; THONG; TEO; NG, 2016; VATANPOUR *et al.*, 2023).

Figura 10 – Poli (álcool vinílico) (PVA), (A) *pellets* e (B) estruturas químicas genéricas.



Fonte: Da autora (2023).

A conversão do poli (acetato de vinila) em PVA, em escala industrial, geralmente se dá na presença de hidróxido de sódio (NaOH), que por meio do processo de saponificação (alcoólise alcalina), hidrolisa os grupos acetato. Logo, a efetividade da reação de saponificação irá interferir diretamente no grau de hidrólise (porcentagem de substituição dos grupos acetato pelos grupos OH) e, conseqüentemente, nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do PVA (ASLAM; KALYAR; RAZA, 2018; OUN *et al.*, 2022; THONG; TEO; NG, 2016). O grau de hidrólise, assim como a variação do comprimento inicial do poli (acetato de vinila), pode gerar PVAs com diferentes massas moleculares, pH, solubilidade, flexibilidade, viscosidade, resistência à tração e adesividade, índice de refração, temperatura de fusão (T_m) e temperatura de transição vítrea (T_g) (DEMERLIS; SCHONEKER, 2003; TANG; ALAVI, 2011; VATANPOUR *et al.*, 2023). Tang e Alavi, (2011), por exemplo, relataram que uma maior massa molecular e maior grau de hidrólise do PVA melhorou a resistência à tração, a resistência à água e a resistência adesiva dos filmes desenvolvidos a partir desse polímero.

De acordo com Vatanpour *et al.* (2023), o PVA hidrolisado de forma incompleta apresenta temperatura de fusão (T_m) em torno de 180 °C, além ser solúvel em água, parcialmente solúvel em etanol e insolúvel em solventes orgânicos. Já o PVA completamente hidrolisado, apresenta a T_m em, aproximadamente, 220 °C, assim como também exibe uma boa adesão e capacidade de formação de filme quando solubilizado em água quente (70 °C) ou em solventes polares, como por exemplo, dimetilsulfóxido (DMSO), N,N-dimetilformamida (DMF), glicerol (quente), entre outros. Os autores ainda relatam que a temperatura de transição vítrea (T_g) para ambos os tipos de PVAs são relativamente semelhantes nas faixas de 65 a 90 °C (VATANPOUR *et al.*, 2023). Além disso, a massa molecular do PVA também pode variar de 9.000 a 400.000 g.mol⁻¹ (DEMERLIS; SCHONEKER, 2003; KOSKI; YIM; SHIVKUMAR, 2004).

O PVA, às vezes também referido como PVOH, POVAL ou PVAL, teve seu primeiro

uso há cerca de 99 anos, em 1924, e, desde então, tem sido utilizado para diversas aplicações industriais, comerciais, médicas e alimentícias (AL-FA'OURI *et al.*, 2023; KOTP *et al.*, 2019; OUN *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2021; THONG; TEO; NG, 2016; VATANPOUR *et al.*, 2023). Atualmente, o PVA é amplamente utilizado devido à sua extraordinária capacidade de formação de filmes, biocompatibilidade, biodegradabilidade, além de ser hidrofílico, atóxico, resistente a óleos, graxas e solventes, ser dúctil, mas também rígido e elástico, possuir alta rigidez dielétrica e atuar como uma excelente barreira contra oxigênio e odores (AL-FA'OURI *et al.*, 2023; DEMERLIS; SCHONEKER, 2003; OUN *et al.*, 2022; RAJESHA SHETTY; LAKSHMEESHA RAO, 2022; VATANPOUR *et al.*, 2023). Este polímero foi regulamentado pela FDA como seguro (GRAS) para entrar em contato direto com alimentos, assim como para ser consumido por humanos via oral (U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION, 2004, 2018), o que permite sua aplicação em embalagens e revestimentos comestíveis para alimentos.

Na literatura é relatada a obtenção eficiente de nanofibras de PVA eletrofiadas e aplicadas na conservação de alimentos, como de frutas e hortaliças. Kowsalya *et al.* (2019), por exemplo, sintetizaram nanopartículas de prata (AgNPs) por rota verde e as incorporaram em nanofibras de PVA eletrofiadas. Para a fiação, foi utilizada uma solução de PVA (10 % p/v) em água, com a adição da nanopartícula. Em seguida, ao revestirem limões (*Citrus limon*) e morangos (*Fragaria ananassa*), observaram que as nanofibras de PVA contendo as nanopartículas possibilitaram a inibição dos microrganismos nos frutos por um período de 10 dias de armazenamento, em temperatura ambiente. Dessa forma, os autores concluíram que as nanofibras desenvolvidas e aplicadas como revestimento ativos são um novo e eficiente método para aumentar a vida útil de frutas, além de ser uma nova abordagem para utilizar o campo da nanobiotecnologia para preservação de alimentos (KOWSALYA *et al.*, 2019).

Já Zeinali *et al.* (2021) produziram um extrato aquoso de jujuba (*Ziziphus jujube* Mill.), que foi liofilizado e adicionado à uma solução polimérica, contendo 10% (p/v) de PVA solubilizado em água. Com isso, a solução polimérica foi eletrofiada e as mantas nanoestruturadas de PVA utilizadas como tampas das embalagens PET. Ao utilizar as embalagens desenvolvidas no armazenamento de morangos (*Fragaria ananassa*) à 4 °C e 85% UR por 12 dias, constataram que as nanofibras liberaram os compostos antioxidantes e antibacterianos do extrato de jujuba no *headspace* da embalagem e sobre os frutos, resultando na preservação da qualidade dos morangos durante o tempo de armazenamento. Em conclusão, os autores afirmaram que mantas nanoestruturadas de PVA enriquecidas com extratos vegetais apresentam um alto potencial de desempenho em sistemas de embalagens ativas (ZEINALI *et al.*, 2021).

Devido à dificuldade em se utilizar de solventes pouco voláteis, como a água, a fiação de PVA por SBS ainda é pouco estudada. Santos *et al.* (2016) foram os pioneiros em estudar e fiar, por SBS, uma solução de PVA (12-20 p/v%) utilizando somente a água como solvente. Com o estudo, foi observado que a formação de nanofibras a partir de soluções aquosas de PVA em concentrações de 12 e 16% (p/v) teve que ser auxiliada por uma fonte de calor (queimador de Bunsen), cujo calor foi atraído para o ponto de formação da fibra, agindo para aquecer localmente o ar a 45 °C, o que não foi possível com as concentrações de 20% (p/v). Dessa forma, os autores concluíram que a fiação de soluções de PVA em água depende da introdução de ar quente no ponto de formação da fibra e do aumento da pressão do ar comprimido e que esses resultados abrem a técnica SBS para outros polímeros solúveis em água (SANTOS *et al.*, 2016). Partindo das conclusões de Santos *et al.* (2016), uma alternativa para viabilizar a formação de fibras de PVA (Figura 12) a partir de soluções poliméricas aquosas pela técnica SBS seria realizar algumas adaptações no equipamento tradicional, como aumentar as temperaturas da solução polimérica, do ambiente e do ar comprimido, assim como, utilizar distâncias de trabalho mais altas, facilitando a evaporação do solvente aquoso.

Figura 11 – Nanofibras poliméricas de poli (álcool vinílico) (PVA) fiadas por SBS.



Fonte: Da autora (2023).

2.6. Nanofibras poliméricas na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças

Os métodos convencionais de conservação pós-colheita de frutas e hortaliças, como refrigeração, modificação atmosférica, incluindo o uso de revestimentos comestíveis, tratamentos térmicos e químicos, entre outros, incluem a preservação física, química e biológica, visam o retardo do processo de amadurecimento e senescência, geralmente por meio do controle da respiração, da inativação enzimática, da redução da contaminação microbológica, principalmente de bactérias deteriorantes, e no controle da evaporação interna da água, realizada principalmente pelo controle da umidade relativa do ambiente. No entanto,

lesões pelo frio (*chilling*), produção e acúmulo de resíduos químicos, perdas de nutrientes e baixa permeabilidade de filmes são alguns exemplos de deficiências inerentes aos métodos tradicionais do prolongamento do prazo de validade (LI *et al.*, 2020; LIU; ZHANG; BHANDARI, 2019; ROBERTSON, 2012).

A refrigeração é a técnica de conservação de frutas e hortaliças *in natura* e minimamente processadas mais utilizada no mundo, tendo a modificação atmosférica como sua principal aliada. Quando ambas as técnicas são combinadas, o potencial de conservação dos vegetais tende a ser incrementado de forma significativa. Embalagens ativas podem ser utilizadas no afã de sofisticar a técnica de atmosfera modificada, aumentando sua eficiência. A principal forma de se aplicar sistemas de embalagens ativas em frutas e hortaliças é por meio de filmes ou revestimentos produzidos a partir da técnica de *casting* (ADILAH; HANANI, 2016; AHMED *et al.*, 2022; KUAI *et al.*, 2021; YIN *et al.*, 2023). No entanto, essa técnica apresenta algumas desvantagens, como por exemplo a necessidade de se esperar a solução filmogênica secar. Partindo desse pressuposto e levando-se em consideração que a área de embalagens está sempre inovando e procurando técnicas mais eficientes, as nanofibras poliméricas tornam-se uma alternativa viável e inovadora em embalagens destinadas à conservação pós-colheita de frutas e hortaliças por possuírem maior porosidade e poderem promover liberação de compostos ativos de forma lenta e constante (FIROUZ; MOHI-ALDEN; OMID, 2021; PRIMOŽIČ; KNEZ; LEITGEB, 2021; SHI *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2022)

Atualmente, as nanofibras poliméricas, sejam elas eletrofiadas ou obtidas por SBS, despertaram ampla atenção e são consideradas candidatas ideais para aplicações na indústria de alimentos, assim como na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças (BRANDÃO *et al.*, 2023; IBRAHIM; KLINGNER, 2020; MIN *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2023; TOPUZ; UYAR, 2020). Sendo assim, quando aplicados em sistemas de embalagens ou revestimentos ativos, esses nanomateriais têm a capacidade de se manter morfológicamente estáveis (MIN *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2023). Suas propriedades térmicas, mecânicas e funcionais se destacam, em comparação à de polímeros convencionais, ditando à embalagem maior eficiência como barreira microbiológica e ao vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono (MIN *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2023). Ademais, apresentam a capacidade de controlar, ao longo do tempo de armazenamento dos alimentos frescos, a liberação dos compostos ativos, como antioxidantes naturais e compostos voláteis, incluindo o inibidor da ação do etileno, 1-MCP, ou mesmo atuarem como veículos de absorvedores de etileno, quando utilizados na forma de sachê, conforme já exemplificado nos tópicos anteriores (ALMASIAN *et al.*, 2020; BRANDÃO *et al.*,

2023; GÖKSEN *et al.*, 2020; LETHA *et al.*, 2020; MIN *et al.*, 2022; MIRANDA *et al.*, 2021; NEOH *et al.*, 2017; SHI *et al.*, 2023).

De acordo com Shi *et al.* (2023), existem pelo menos 20 empresas em todo o mundo, na atualidade, que produzem mais de 50 tipos de produtos de nanofibras poliméricas, os quais são usados principalmente para filtração de gás e líquido e separação de óleo de águas residuais. No entanto, os autores também enfatizam que sistemas de embalagens e revestimentos ativos desenvolvidos a partir de nanofibras poliméricas têm grande potencial para estarem, em breve, disponíveis para aplicação comercial visando a conservação pós-colheita de frutas e hortaliças. Portanto, as nanofibras poliméricas são nanomateriais promissores na área de alimentos e se mostram eficazes em promover o prolongamento das funcionalidades das embalagens ativas e manter a qualidade pós-colheita de frutas e hortaliças ao longo do armazenamento.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Diversos são os trabalhos disponíveis na literatura envolvendo o desenvolvimento de embalagens destinadas à conservação de frutas e hortaliças, tendo em vista que esses alimentos são altamente suscetíveis a diversas perdas pós-colheita. No entanto, essa área de embalagens e revestimentos necessita de inovações tecnológicas mais eficientes. A crescente utilização da nanotecnologia atrelada à política *Clean Label* e à sustentabilidade, no cenário atual, abre novas oportunidades de se incorporar compostos ativos, como o 1-metilciclopropeno (1-MCP) e compostos antioxidantes naturais obtidos de fontes vegetais convencionais (polpa de açaí) e não convencionais (farelo de cacau, cascas de jabuticaba e resíduos de cenoura), em nanofibras poliméricas destinados às embalagens ativas.

A aplicação da técnica emergente de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) é ainda pouco explorada para a produção de nanofibras poliméricas de poli(ácido láctico) (PLA), o que, por si só, já caracteriza o presente estudo como inovador e atual. Embora já existam relatos, na literatura, do uso do SBS no desenvolvimento de nanofibras de poli(álcool vinílico) (PVA), partindo-se de soluções poliméricas com solventes altamente voláteis, o desenvolvimento de nanofibras de PVA por SBS, a partir de água ou extratos aquosos pouco voláteis, ainda não foi estudado, o que enaltece ainda mais o caráter pioneiro e inovador desta proposta. Dessa forma, apesar de crescente o interesse, nos últimos anos, de se aplicar a nanotecnologia, assim como nanofibras poliméricas na conservação de alimentos, ainda há lacunas na literatura passíveis de serem exploradas, relacionando a técnica SBS,

extratos aquosos de plantas, 1-metilciclopropeno (1-MCP) e qualidade pós-colheita de frutas e hortaliças.

Portanto, os resultados obtidos com o desenvolvimento por SBS de nanofibras de PLA com 1-MCP e de PVA com extratos antioxidantes, assim como na aplicação em sistemas de embalagens ativas, foram altamente relevantes e podem servir de base para futuros estudos, uma vez que trazem informações significativas para o meio acadêmico e para o avanço de pesquisas científicas na área da nanotecnologia, fiação por SBS e de embalagens destinadas à conservação pós-colheita de frutas e hortaliças.

REFERÊNCIAS

- ADILAH, Z. A. M.; HANANI, Z. A. N. Active packaging of fish gelatin films with *Morinda citrifolia* oil. **Food Bioscience**, v. 16, p. 66–71, 1 dez. 2016. . Acesso em: 19 jan. 2023.
- AHMED, Md. W.; HAQUE, Md. A.; MOHIBULLAH, Md.; KHAN, Md. S. I.; ISLAM, M. A.; MONDAL, Md. H. T.; AHMMED, R. A review on active packaging for quality and safety of foods: Current trends, applications, prospects and challenges. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 33, p. 100913, set. 2022.
- AKHTAR, M. J.; JACQUOT, M.; JASNIEWSKI, J.; JACQUOT, C.; IMRAN, M.; JAMSHIDIAN, M.; PARIS, C.; DESOBRY, S. Antioxidant capacity and light-aging study of HPMC films functionalized with natural plant extract. **Carbohydrate Polymers**, v. 89, n. 4, p. 1150–1158, ago. 2012.
- ALASALVAR, C.; GRIGOR, J. M.; ZHANG, D.; QUANTICK, P. C.; SHAHIDI, F. Comparison of Volatiles, Phenolics, Sugars, Antioxidant Vitamins, and Sensory Quality of Different Colored Carrot Varieties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 3, p. 1410–1416, 1 mar. 2001. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf000595h>>.
- ALBUQUERQUE, U. P.; RAMOS, M. A.; MELO, J. G. New strategies for drug discovery in tropical forests based on ethnobotanical and chemical ecological studies. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 140, n. 1, p. 197–201, 6 mar. 2012. . Acesso em: 23 jun. 2022.
- AL-FA'OURI, A. M.; LAFI, O. A.; ABU-SAFE, H. H.; ABU-KHARMA, M. Investigation of optical and electrical properties of copper oxide - polyvinyl alcohol nanocomposites for solar cell applications. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 4, p. 104535, 1 abr. 2023. . Acesso em: 13 fev. 2023.
- ALMASIAN, A.; NAJAFI, F.; EFTEKHARI, M.; ARDEKANI, M. R. S.; SHARIFZADEH, M.; KHANAVI, M. Polyurethane/carboxymethylcellulose nanofibers containing *Malva sylvestris* extract for healing diabetic wounds: Preparation, characterization, in vitro and in vivo studies. **Materials Science and Engineering: C**, v. 114, p. 111039, set. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092849311931906X>>.
- ARIYANTO, H. D.; CHIBA, M.; OGUMA, K.; TATSUKI, M.; YOSHII, H. Release behavior of 1-methylcyclopropene coated paper-based shellac solution in response to stepwise humidity changes to develop novel functional packaging for fruit. **Packaging Technology and Science**, v. 32, n. 10, p. 523–533, 10 out. 2019.
- ARIYANTO, H. D.; YOSHII, H. Fruit Packaging with 1-Methylcyclopropene Included in Alpha-Cyclodextrin. **Functionality of Cyclodextrins in Encapsulation for Food Applications**, p. 299–313, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-80056-7_15>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- ARRUDA, T. R.; BERNARDES, P. C.; MORAES, A. R. F. e; SOARES, N. de F. F. Natural bioactives in perspective: The future of active packaging based on essential oils and plant

extracts themselves and those complexed by cyclodextrins. **Food Research International**, v. 156, p. 111160, 1 jun. 2022. . Acesso em: 26 jan. 2023.

ASLAM, M.; KALYAR, M. A.; RAZA, Z. A. Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites. **Polymer Engineering & Science**, v. 58, n. 12, p. 2119–2132, 1 dez. 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pen.24855>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

AURAS, R.; LIM, L. T.; SELKE, S. E. M.; TSUJI, H. **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Application**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

AZERÊDO, M. S. de; MARCONCINI, J. M. Effect of solution concentration in microfiltration properties of <sc>PLA</sc> mats produced by solution blow spinning. **Polymer Engineering & Science**, v. 61, n. 3, p. 856–863, 16 mar. 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.25634>>.

BAPTISTA, R. C.; HORITA, C. N.; SANT'ANA, A. S. Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood: A review. **Food Research International**, v. 127, p. 108762, jan. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996919306489>>.

BARHOUM, A.; PAL, K.; RAHIER, H.; ULUDAG, H.; KIM, I. S.; BECHELANY, M. Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. **Applied Materials Today**, v. 17, p. 1–35, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>>.

BISWAS, R.; ALAM, M.; SARKAR, A.; HAQUE, M. I.; HASAN, Md. M.; HOQUE, M. Application of nanotechnology in food: processing, preservation, packaging and safety assessment. **Heliyon**, v. 8, n. 11, p. e11795, 1 nov. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844022030833>>. Acesso em: 5 fev. 2023.

BLANKENSHIP, S. M.; DOLE, J. M. 1-Methylcyclopropene: a review. **Postharvest Biology and Technology**, v. 28, n. 1, p. 1–25, 1 abr. 2003. . Acesso em: 29 jan. 2023.

BRANDÃO, R. M.; BATISTA, L. R.; DE OLIVEIRA, J. E.; BARBOSA, R. B.; NELSON, D. L.; CARDOSO, M. G. In vitro and in vivo efficacy of poly(lactic acid) nanofiber packaging containing essential oils from *Ocimum basilicum* L. and *Ocimum gratissimum* L. against *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus niger* in table grapes. **Food Chemistry**, v. 400, p. 134087, 30 jan. 2023. . Acesso em: 9 fev. 2023.

BRASIL. ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 91, de 11 de maio de 2001 - Dispõe sobre critérios Gerais e Classificação de Materiais para Embalagens e Equipamentos em Contato com Alimentos constante do Anexo desta Resolução.**2001.

BRENNA, O. v; PAGLIARINI, E. Multivariate Analysis of Antioxidant Power and Polyphenolic Composition in Red Wines. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 10, p. 4841–4844, 1 out. 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/jf0104376>>.

CAMARGO NEVES, L.; MONIQUE CARVALHO DA SILVA, P.; RUFFO ROBERTO, S.; MAYARA ROCHA LEÃO, P.; DE BRITO CARVALHO, L.; CRYSTHINA LUCAS DA SILVA, B.; CISNEROS-ZEVALLOS, L. Physiological maturity and wound-based orchard practices influence the antioxidant content and metabolic activity of two species of açai fruit at harvest and during storage. **Food Chemistry**, v. 382, p. 132279, 15 jul. 2022. . Acesso em: 29 jan. 2023.

CARRASCO, F.; PAGÈS, P.; GÁMEZ-PÉREZ, J.; SANTANA, O. O.; MASPOCH, M. L. Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 2, p. 116–125, 1 fev. 2010. . Acesso em: 7 fev. 2023.

CHAN, R. B. Y. Packaging solutions for household food waste in the context of the food/beverage–packaging industry: A comparative review of empirical literature and industry press releases. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 185, p. 106479, 1 out. 2022. . Acesso em: 16 jan. 2023.

CHANG, S. K.; ALASALVAR, C.; SHAHIDI, F. Superfruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health effects – A comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. 10, p. 1580–1604, 31 maio 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2017.1422111>>.

CHEN, S.; SUN, Z.; ZHOU, H.; SHU, L. Simple or complex: How temporal landmarks shape consumer preference for food packages. **Food Quality and Preference**, v. 104, p. 104734, 1 mar. 2023. . Acesso em: 16 jan. 2023.

CHENG, Y.; DENG, S.; CHEN, P.; RUAN, R. Polylactic acid (PLA) synthesis and modifications: A review. **Frontiers of Chemistry in China**, v. 4, n. 3, p. 259–264, 22 ago. 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11458-009-0092-x>>. Acesso em: 7 fev. 2023.

CLUNAN, A.; RODINE-HARDY, K. **Nanotechnology in a Globalized World: Strategic Assessments of an Emerging Technology**. [s.l: s.n.].

CUI, Y.; ZHANG, R.; CHENG, M.; GUO, Y.; WANG, X. Sustained release and antioxidant activity of active potato starch packaging films encapsulating thymol with MCM-41. **LWT**, v. 173, p. 114342, 1 jan. 2023. . Acesso em: 18 jan. 2023.

DA SILVA PARIZE, D. D.; FOSCHINI, M. M.; DE OLIVEIRA, J. E.; KLAMCZYNSKI, A. P.; GLENN, G. M.; MARCONCINI, J. M.; MATTOSO, L. H. C. Solution blow spinning: parameters optimization and effects on the properties of nanofibers from poly(lactic acid)/dimethyl carbonate solutions. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 9, p. 4627–4638, maio 2016.

DADOL, G. C.; KILIC, A.; TIJING, L. D.; LIM, K. J. A.; CABATINGAN, L. K.; TAN, N. P. B.; STOJANOVSKA, E.; POLAT, Y. Solution blow spinning (SBS) and SBS-spun nanofibers: Materials, methods, and applications. **Materials Today Communications**, v. 25, p. 101656, dez. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352492820326672>>.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

DARISTOTLE, J. L.; BEHRENS, A. M.; SANDLER, A. D.; KOFINAS, P. A Review of the Fundamental Principles and Applications of Solution Blow Spinning. **ACS applied materials & interfaces**, v. 8, n. 51, p. 34951–34963, dez. 2016.

DE ALBUQUERQUE, T. L.; MARQUES JÚNIOR, J. E.; DE QUEIROZ, L. P.; RICARDO, A. D. S.; ROCHA, M. V. P. Polylactic acid production from biotechnological routes: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 186, p. 933–951, 1 set. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813021015117>>. Acesso em: 7 fev. 2023.

DEMERLIS, C. C.; SCHONEKER, D. R. Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA). **Food and Chemical Toxicology**, v. 41, n. 3, p. 319–326, 1 mar. 2003. . Acesso em: 13 fev. 2023.

DIAS, C.; RIBEIRO, T.; RODRIGUES, A. C.; FERRANTE, A.; VASCONCELOS, M. W.; PINTADO, M. Improving the ripening process after 1-MCP application: Implications and strategies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 113, p. 382–396, 1 jul. 2021. . Acesso em: 25 jan. 2023.

ELLISON, C. J.; PHATAK, A.; GILES, D. W.; MACOSKO, C. W.; BATES, F. S. Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup. **Polymer**, v. 48, n. 11, p. 3306–3316, maio 2007.

EUROPEAN COMMISSION. **EU Guidance to the Commission Regulation (EC) No 450/2009 of 29 May 2009 on active and intelligent materials and articles intended to come into the contact with food**European Commission2009.

FAO/WHO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS / WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Codex Alimentarius. General Standard for Food Additives (Codex Stan 192-1995)**2016. Disponível em: <http://www.fao.org/gsfonline/docs/CXS_192e.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367–392, 15 dez. 2016. . Acesso em: 7 fev. 2023.

FIROUZ, M. S.; MOHI-ALDEN, K.; OMID, M. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. **Food Research International**, v. 141, p. 110113, 1 mar. 2021. . Acesso em: 18 jan. 2023.

FRANCISCO, E. V. de; GARCÍA-ESTEPA, R. M. Nanotechnology in the agrofood industry. **Journal of Food Engineering**, v. 238, n. November 2017, p. 1–11, 2018.

GARLOTTA, D. A Literature Review of Poly(Lactic Acid). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 9, n. 2, p. 63–84, 2001.

GASPAR, M. C.; BRAGA, M. E. M. Edible films and coatings based on agrifood residues: a new trend in the food packaging research. **Current Opinion in Food Science**, v. 50, p. 101006, abr. 2023.

GÖKSEN, G.; FABRA, M. J.; EKIZ, H. I.; LÓPEZ-RUBIO, A. Phytochemical-loaded electrospun nanofibers as novel active edible films: Characterization and antibacterial efficiency in cheese slices. **Food Control**, v. 112, p. 107133, jun. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956713520300499>>.

GRAND VIEW RESEARCH. **Active, Smart And Intelligent Packaging Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application, Regional Outlook, Competitive Strategies, And Segment Forecasts, 2019 To 2025**. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/active-smart-intelligent-packaging-market>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

GRAND VIEW RESEARCH. **Plastic Packaging Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Rigid, Flexible), By Technology (Injection Molding, Extrusion, Blow Molding, Thermoforming), By Application (Food & Beverage), And Segment Forecasts, 2022 - 2030**. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-packaging-market>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

GUGULOTHU, D.; BARHOUM, A.; NERELLA, R.; AJMER, R.; BECHLANY, M. Fabrication of Nanofibers: Electrospinning and Non-Electrospinning Techniques. *Em: Handbook of Nanofibers*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 1–34.

GUPTA, B.; REVAGADE, N.; HILBORN, J. Poly(lactic acid) fiber: An overview. **Progress in Polymer Science**, v. 32, n. 4, p. 455–482, abr. 2007.

HAMAD, A. F.; HAN, J. H.; KIM, B. C.; RATHER, I. A. The intertwine of nanotechnology with the food industry. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 1, p. 27–30, 2018.

HASHEMI, S. M. B.; JAFARPOUR, D. The efficacy of edible film from Konjac glucomannan and saffron petal extract to improve shelf life of fresh-cut cucumber. **Food Science & Nutrition**, v. 8, n. 7, p. 3128–3137, 1 jul. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.1544>>. Acesso em: 25 jan. 2023.

HE, X.; DENG, H.; HWANG, H. min. The current application of nanotechnology in food and agriculture. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 27, n. 1, p. 1–21, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>>.

HUANG, T.; QIAN, Y.; WEI, J.; ZHOU, C. Polymeric Antimicrobial Food Packaging and Its Applications. **Polymers** **2019**, Vol. 11, Page 560, v. 11, n. 3, p. 560, 25 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/11/3/560/htm>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

HUANG, Z.-M.; ZHANG, Y.-Z.; KOTAKI, M.; RAMAKRISHNA, S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 15, p. 2223–2253, nov. 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353803001787>>.

IBRAHIM, H. M.; KLINGNER, A. A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. **Polymer Testing**, v. 90, p. 106647, out. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941820305298>>.

ISLAM, M. T.; HUDA, N.; ABDULLAH, A. B.; SAIDUR, R. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, n. November 2017, p. 987–1018, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>>.

JANJARASSKUL, T.; SUPPAKUL, P. Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1225278>, v. 58, n. 5, p. 808–831, 24 mar. 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2016.1225278>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

KAHYA, N.; KESTIR, S. M.; ÖZTÜRK, S.; YOLAÇ, A.; TORLAK, E.; KALAYCIOĞLU, Z.; AKIN-EVINGÜR, G.; ERIM, F. B. Antioxidant and antimicrobial chitosan films enriched with aqueous sage and rosemary extracts as food coating materials: Characterization of the films and detection of rosmarinic acid release. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 217, p. 470–480, set. 2022.

KLOTZ, S.; KAUFMANN, N.; KUENZ, A.; PRÜSSE, U. Biotechnological production of enantiomerically pure d-lactic acid. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 22, p. 9423–9437, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-016-7843-7>>. Acesso em: 7 fev. 2023.

KONUĞ TAKMA, D.; KOREL, F. Active packaging films as a carrier of black cumin essential oil: Development and effect on quality and shelf-life of chicken breast meat. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 19, p. 210–217, 1 mar. 2019. . Acesso em: 19 jan. 2023.

KOSKI, A.; YIM, K.; SHIVKUMAR, S. Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning. **Materials Letters**, v. 58, n. 3–4, p. 493–497, 1 jan. 2004. . Acesso em: 13 fev. 2023.

KOTP, A. A.; FARGHALI, A. A.; AMIN, R. M.; BDEL MOATY, S. A.; EL-DEEN, A. G.; GADELHAK, Y. M.; EL-ELA, F. A.; YOUNES, H. A.; SYAME, S. M.; MAHMOUD, R. K. Green-Synthesis of Ag Nanoparticles and Its Composite with PVA Nanofiber as a Promising Cd²⁺ Adsorbent and Antimicrobial Agent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062688312&doi=10.1016%2Fj.jece.2019.102977&partnerID=40&md5=2dad01ac66fdb96e8bc40e92511f178>>.

KOWSALYA, E.; CHRISTAS, K. M.; BALASHANMUGAM, P.; SELVI, A. T.; RANI, I. J. C. Biocompatible silver nanoparticles/poly(vinyl alcohol) electrospun nanofibers for potential antimicrobial food packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 21, p. 100379, 1 set. 2019. . Acesso em: 13 fev. 2023.

KRAŚNIEWSKA, K.; GALUS, S.; GNIEWOSZ, M. Biopolymers-Based Materials Containing Silver Nanoparticles as Active Packaging for Food Applications—A Review. **International Journal of Molecular Sciences** 2020, Vol. 21, Page 698, v. 21, n. 3, p. 698, 21 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1422-0067/21/3/698/htm>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

KUAI, L.; LIU, F.; CHIOU, B. Sen; AVENA-BUSTILLOS, R. J.; MCHUGH, T. H.; ZHONG, F. Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 120, p. 106992, 1 nov. 2021. . Acesso em: 25 jan. 2023.

LETHA, N.; JOSEPH, J.; SUNDAR, G.; PILLAI, A. U.; JOHN, A.; ABRAHAM, A. Incorporation of phytochemicals into electrospun scaffolds for wound-healing applications in vitro and in vivo. **Journal of Bioactive and Compatible Polymers**, v. 35, n. 4–5, p. 451–466, 17 jul. 2020. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0883911520939989>>.

LI, D.; MCCANN, J. T.; XIA, Y. Use of Electrospinning to Directly Fabricate Hollow Nanofibers with Functionalized Inner and Outer Surfaces. **Small**, v. 1, n. 1, p. 83–86, 13 out. 2004. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/sml.200400056>>.

LI, L.; SHUAI, L.; SUN, J.; LI, C.; YI, P.; ZHOU, Z.; HE, X.; LING, D.; SHENG, J.; KONG, K. W.; ZHENG, F.; LI, J.; LIU, G.; XIN, M.; LI, Z.; TANG, Y. The Role of 1-Methylcyclopropene in the regulation of ethylene biosynthesis and ethylene receptor gene expression in *Mangifera indica* L. (Mango Fruit). **Food Science & Nutrition**, v. 8, n. 2, p. 1284–1294, 1 fev. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.1417>>. Acesso em: 29 jan. 2023.

LIM, L.-T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Processing technologies for poly(lactic acid). **Progress in Polymer Science**, v. 33, n. 8, p. 820–852, ago. 2008.

LIU, F.; AVENA-BUSTILLOS, R. J.; BILBAO-SAINZ, C.; WOODS, R.; CHIOU, B.-S.; WOOD, D.; WILLIAMS, T.; YOKOYAMA, W.; GLENN, G. M.; MCHUGH, T. H.; ZHONG, F. Solution Blow Spinning of Food-Grade Gelatin Nanofibers. **Journal of Food Science**, v. 82, n. 6, p. 1402–1411, jun. 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1750-3841.13710>>.

LIU, W.; ZHANG, M.; BHANDARI, B. Nanotechnology – A shelf life extension strategy for fruits and vegetables. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1589415>, v. 60, n. 10, p. 1706–1721, 30 maio 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2019.1589415>>. Acesso em: 5 fev. 2023.

LIU, Y.; SU, G.; ZHANG, B.; JIANG, G.; YAN, B. Nanoparticle-based strategies for detection and remediation of environmental pollutants. **The Analyst**, v. 136, n. 5, p. 872, 2011. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=c0an00905a>>.

LIU, Y.; ZHANG, X.; LI, C.; QIN, Y.; XIAO, L.; LIU, J. Comparison of the structural, physical and functional properties of κ -carrageenan films incorporated with pomegranate flesh and peel extracts. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 1076–1088, mar. 2020.

LÓPEZ-GÓMEZ, A.; NAVARRO-MARTÍNEZ, A.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, G. B. Effects of essential oils released from active packaging on the antioxidant system and quality of lemons during cold storage and commercialization. **Scientia Horticulturae**, v. 312, p. 111855, 15 mar. 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423823000316>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

LOURENÇO, S. C.; MOLDÃO-MARTINS, M.; ALVES, V. D. Antioxidants of Natural Plant Origins: From Sources to Food Industry Applications. **Molecules** 2019, Vol. 24, Page 4132, v. 24, n. 22, p. 4132, 15 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1420-3049/24/22/4132/htm>>. Acesso em: 25 jan. 2023.

LUCAS-GONZÁLEZ, R.; YILMAZ, B.; MOUSAVI KHANEGHAH, A.; HANO, C.; SHARIATI, M. A.; BANGAR, S. P.; GOKSEN, G.; DHAMA, K.; LORENZO, J. M. Cinnamon: An antimicrobial ingredient for active packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 35, p. 101026, 1 mar. 2023. . Acesso em: 18 jan. 2023.

LUNT, J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 59, n. 1–3, p. 145–152, 3 jan. 1998. . Acesso em: 7 fev. 2023.

MANZOOR, A.; YOUSUF, B.; PANDITH, J. A.; AHMAD, S. Plant-derived active substances incorporated as antioxidant, antibacterial or antifungal components in coatings/films for food packaging applications. **Food Bioscience**, v. 53, p. 102717, jun. 2023.

MARINGGAL, B.; HASHIM, N.; MOHAMED AMIN TAWAKKAL, I. S.; MUDA MOHAMED, M. T. Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. **Trends in Food Science & Technology**, v. 96, p. 253–267, 1 fev. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224419305771>>. Acesso em: 5 fev. 2023.

MARYAM ADILAH, Z. A.; JAMILAH, B.; NUR HANANI, Z. A. Functional and antioxidant properties of protein-based films incorporated with mango kernel extract for active packaging. **Food Hydrocolloids**, v. 74, p. 207–218, 1 jan. 2018. . Acesso em: 29 jan. 2023.

MATA, C. I.; VAN DE POEL, B.; HERTOOG, M. L. A. T. M.; TRAN, D.; NICOLAI, B. M. Transcription analysis of the ethylene receptor and CTR genes in tomato: The effects of on and off-vine ripening and 1-MCP. **Postharvest Biology and Technology**, v. 140, p. 67–75, jun. 2018.

MEDEIROS, E. S.; GLENN, G. M.; KLAMCZYNSKI, A. P.; ORTS, W. J.; MATTOSO, L. H. C. Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 113, n. 4, p. 2322–2330, ago. 2009.

MELO, P. S.; ARRIVETTI, L. de O. R.; ALENCAR, S. M. de; SKIBSTED, L. H. Antioxidative and prooxidative effects in food lipids and synergism with α -tocopherol of açai seed extracts and grape rachis extracts. **Food Chemistry**, v. 213, p. 440–449, dez. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814616310044>>.

MIN, T.; ZHOU, L.; SUN, X.; DU, H.; ZHU, Z.; WEN, Y. Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: A review. **Food Chemistry**, v. 391, p. 133239, 15 out. 2022. . Acesso em: 28 jul. 2022.

MIR, S. A.; DAR, B. N.; WANI, A. A.; SHAH, M. A. Effect of plant extracts on the techno-functional properties of biodegradable packaging films. **Trends in Food Science & Technology**, v. 80, p. 141–154, 1 out. 2018. . Acesso em: 26 jan. 2023.

MIRANDA, K. W. E.; BRESOLIN, J. D.; NATARELLI, C. V. L.; BENEVIDES, S. D.; BASTOS, M. do S. R.; MATTOSO, L. H. C.; DE OLIVEIRA, J. E. Potential use of poly(lactic acid) nanofibers mats as Nano-sachets in postharvest of climacteric fruits and vegetables. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 30, p. 50735, 10 ago. 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.50735>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

MOGHADAM, F. A. M.; KHOSHKALAMPOUR, A.; MOGHADAM, F. A. M.; POURVATANDOUST, S.; NAEIJIAN, F.; GHORBANI, M. Preparation and physicochemical evaluation of casein/basil seed gum film integrated with guar gum/gelatin based nanogel containing lemon peel essential oil for active food packaging application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 224, p. 786–796, 1 jan. 2023. . Acesso em: 18 jan. 2023.

MOHMOOD, I.; LOPES, C. B.; LOPES, I.; AHMAD, I.; DUARTE, A. C.; PEREIRA, E. Nanoscale materials and their use in water contaminants removal-a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 3, p. 1239–1260, 2013.

NEOH, T. L.; ARIYANTO, H. D.; MENÉNDEZ GALVAN, P.; YOSHII, H. Controlled release of 1-methylcyclopropene from its functionalised electrospun fibres under constant and linearly ramped humidity. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1325520>, v. 34, n. 10, p. 1690–1702, 3 out. 2017. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19440049.2017.1325520>>. Acesso em: 26 set. 2022.

NEOH, T. L.; KOECHER, K.; REINECCIUS, G.; FURUTA, T.; YOSHII, H. Dissociation characteristic of the inclusion complex of cyclomaltohexaose (α -cyclodextrin) with 1-methylcyclopropene in response to stepwise rising relative humidity. **Carbohydrate Research**, v. 345, n. 14, p. 2085–2089, set. 2010.

NI, X.; YU, J.; SHAO, P.; YU, J.; CHEN, H.; GAO, H. Preservation of *Agaricus bisporus* freshness with using innovative ethylene manipulating active packaging paper. **Food Chemistry**, v. 345, p. 128757, maio 2021.

NILE, S. H.; BASKAR, V.; SELVARAJ, D.; NILE, A.; XIAO, J.; KAI, G. Nanotechnologies in Food Science: Applications, Recent Trends, and Future Perspectives. **Nano-Micro Letters** **2020** **12:1**, v. 12, n. 1, p. 1–34, 4 fev. 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-020-0383-9>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

OKIYAMA, D. C. G.; NAVARRO, S. L. B.; RODRIGUES, C. E. C. Cocoa shell and its compounds: Applications in the food industry. **Trends in Food Science and Technology**, v. 63, p. 103–112, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.007>>.

OLAWOYIN, R. Nanotechnology: The future of fire safety. **Safety Science**, v. 110, n. August, p. 214–221, 2018.

OLIVEIRA, J. E.; MORAES, E. A.; COSTA, R. G. F.; AFONSO, A. S.; MATTOSO, L. H. C.; ORTS, W. J.; MEDEIROS, E. S. Nano and submicrometric fibers of poly(D,L-lactide) obtained by solution blow spinning: Process and solution variables. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 122, n. 5, p. 3396–3405, dez. 2011.

ORTIZ, C. M.; MAURI, A. N.; VICENTE, A. R. Use of soy protein based 1-methylcyclopropene-releasing pads to extend the shelf life of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 20, p. 281–287, 1 out. 2013. . Acesso em: 30 jan. 2023.

OUN, A. A.; SHIN, G. H.; RHIM, J. W.; KIM, J. T. Recent advances in polyvinyl alcohol-based composite films and their applications in food packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 34, p. 100991, 1 dez. 2022. . Acesso em: 13 fev. 2023.

PAPOUTSIS, K.; EDELENBOS, M. Postharvest environmentally and human-friendly pre-treatments to minimize carrot waste in the supply chain caused by physiological disorders and fungi. **Trends in Food Science & Technology**, v. 112, p. 88–98, jun. 2021.

PENG, Y.; WU, Y.; LI, Y. Development of tea extracts and chitosan composite films for active packaging materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 59, p. 282–289, ago. 2013.

PÉREZ-ESTEVE, É.; ALCOVER, A.; BARAT, J. M.; FERNÁNDEZ-SEGOVIA, I. What do Spanish consumers think about employing nanotechnology in food packaging? **Food Packaging and Shelf Life**, v. 34, p. 100998, 1 dez. 2022. . Acesso em: 16 jan. 2023.

PRIMOŽIČ, M.; KNEZ, Ž.; LEITGEB, M. (Bio)Nanotechnology in Food Science—Food Packaging. **Nanomaterials**, v. 11, n. 2, p. 292, 22 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-4991/11/2/292>>.

QIN, Y.; LIU, Y.; ZHANG, X.; LIU, J. Development of active and intelligent packaging by incorporating betalains from red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel into starch/polyvinyl alcohol films. **Food Hydrocolloids**, v. 100, p. 105410, 1 mar. 2020. . Acesso em: 29 jan. 2023.

QUATRIN, A.; PAULETTO, R.; MAURER, L. H.; MINUZZI, N.; NICHELLE, S. M.; CARVALHO, J. F. C.; MARÓSTICA, M. R.; RODRIGUES, E.; BOCHI, V. C.; EMANUELLI, T. Characterization and quantification of tannins, flavonols, anthocyanins and matrix-bound polyphenols from jaboticaba fruit peel: A comparison between *Myrciaria trunciflora* and *M. jaboticaba*. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 78, p. 59–74, maio 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889157518304022>>.

RADEMACHER, W. Plant Growth Regulators: Backgrounds and Uses in Plant Production. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 34, n. 4, p. 845–872, 1 dez. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00344-015-9541-6>>. Acesso em: 29 jan. 2023.

RAJESHA SHETTY, G.; LAKSHMEESHA RAO, B. Preparation and characterization of silk fibroin-polyvinyl alcohol (PVA) blend films for food packaging materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 55, p. 194–200, 1 jan. 2022. . Acesso em: 13 fev. 2023.

REBOLLO-HERNANZ, M.; CAÑAS, S.; TALADRID, D.; SEGOVIA, Á.; BARTOLOMÉ, B.; AGUILERA, Y.; MARTÍN-CABREJAS, M. A. Extraction of phenolic compounds from cocoa shell: Modeling using response surface methodology and artificial neural networks. **Separation and Purification Technology**, v. 270, set. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586621004913>>.

REBOLLO-HERNANZ, M.; ZHANG, Q.; AGUILERA, Y.; MARTÍN-CABREJAS, M. A.; MEJIA, E. G. Cocoa Shell Aqueous Phenolic Extract Preserves Mitochondrial Function and Insulin Sensitivity by Attenuating Inflammation between Macrophages and Adipocytes In Vitro. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 63, n. 10, p. 1801413, 3 maio 2019.

REPORTS AND DATA. **Nano-enabled Packaging Market | Size, Trends & Analysis**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.reportsanddata.com/report-detail/nano-enabled-packaging-market>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

RIAHI, Z.; PRIYADARSHI, R.; RHIM, J.-W.; BAGHERI, R. Gelatin-based functional films integrated with grapefruit seed extract and TiO₂ for active food packaging applications. **Food Hydrocolloids**, v. 112, p. 106314, mar. 2021.

ROBERTSON, G. L. **Food Packaging : Principles and Practice, Third Edition.** [s.l.] CRC Press, 2012. 719 p.

ROBREDO, J.; CUNHA, M. B. da. Aplicação de técnicas infométricas para identificar a abrangência do léxico básico que caracteriza os processos de indexação e recuperação da informação. **Ciência da Informação**, v. 27, n. 1, p. 11–27, 1998.

ROONEY, M. L. Novel Food Packaging. **Technology of Reduced-Additive Foods**, p. 95–122, 1993. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-2115-0_5>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ROSSETTO, R.; MACIEL, G. M.; BORTOLINI, D. G.; RIBEIRO, V. R.; HAMINIUK, C. W. I. Acai pulp and seeds as emerging sources of phenolic compounds for enrichment of residual yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*) through biosorption process. **LWT**, v. 128, p. 109447, jun. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0023643820304369>>.

SANTOS, A. M. C.; MEDEIROS, E. L. G.; BLAKER, J. J.; MEDEIROS, E. S. Aqueous solution blow spinning of poly(vinyl alcohol) micro- and nanofibers. **Materials Letters**, v. 176, p. 122–126, ago. 2016.

SHI, C.; FANG, D.; HUANG, C.; LYU, L.; WU, W.; LI, W. Electrospun biopolymer material for antimicrobial function of fresh fruit and vegetables: Application perspective and challenges. **LWT**, v. 174, p. 114374, 15 jan. 2023. . Acesso em: 19 jan. 2023.

SILVA, I. D. de L.; MORAES FILHO, L. E. P. T. de; CAETANO, V. F.; ANDRADE, M. F. de; HALLWASS, F.; BRITO, A. M. S. S.; VINHAS, G. M. Development of antioxidant active PVA films with plant extract of *Caesalpinia ferrea* Martius. **LWT**, v. 144, p. 111215, jun. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0023643821003686>>.

SINGH, A. K.; RAMAKANTH, D.; KUMAR, A.; LEE, Y. S.; GAIKWAD, K. K. Active packaging technologies for clean label food products: a review. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, n. 5, p. 4314–4324, 1 out. 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11694-021-01024-3>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. max; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. [s.l.: s.n.]888 p.

TANG, X.; ALAVI, S. Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. **Carbohydrate Polymers**, v. 85, n. 1, p. 7–16, 22 abr. 2011. . Acesso em: 13 fev. 2023.

TAWAKKAL, I. S. M. A.; CRAN, M. J.; MILTZ, J.; BIGGER, S. W. A Review of Poly(Lactic Acid)-Based Materials for Antimicrobial Packaging. **Journal of Food Science**, v. 79, n. 8, p. R1477–R1490, ago. 2014.

THE PACKAGING INSTITUTE INTERNATIONAL. Glossary of Packaging Terms: Standard Definitions of Trade Terms Commonly Used in Packaging. 1988. Disponível em: <<http://www.tp21.com/?id=299>>. Acesso em: 16 jan. 2023.

THONG, C. C.; TEO, D. C. L.; NG, C. K. Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 172–180, 15 mar. 2016. . Acesso em: 13 fev. 2023.

TOPUZ, F.; UYAR, T. Antioxidant, antibacterial and antifungal electrospun nanofibers for food packaging applications. **Food Research International**, v. 130, p. 108927, abr. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996919308130>>.

TRUBETSKAYA, A.; SCHOLTEN, P. B. V.; CORREDIG, M. Changes towards more sustainable food packaging legislation and practices. A survey of policy makers and stakeholders in Europe. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 32, p. 100856, 1 jun. 2022. . Acesso em: 16 jan. 2023.

U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. **GRAS Notice No. GRN 141**. [s.l: s.n.].

U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. **GRAS Notice No. GRN 767**. [s.l: s.n.].

VATANPOUR, V.; TEBER, O. O.; MEHRABI, M.; KOYUNCU, I. Polyvinyl alcohol-based separation membranes: a comprehensive review on fabrication techniques, applications and future prospective. **Materials Today Chemistry**, v. 28, p. 101381, 1 mar. 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468519423000083>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

WANG, C.; MAO, L.; YAO, J.; ZHU, H. Improving the active food packaging function of poly(lactic acid) film coated by poly(vinyl alcohol) based on proanthocyanidin functionalized layered clay. **LWT**, v. 174, p. 114407, 15 jan. 2023. . Acesso em: 18 jan. 2023.

WANG, S.; MARCONE, M.; BARBUT, S.; LIM, L.-T. The Impact of Anthocyanin-Rich Red Raspberry Extract (ARRE) on the Properties of Edible Soy Protein Isolate (SPI) Films. **Journal of Food Science**, v. 77, n. 4, p. C497–C505, abr. 2012.

WARNER, C. L.; ADDLEMAN, R. S.; CINSON, A. D.; DROUBAY, T. C.; ENGELHARD, M. H.; NASH, M. A.; YANTASEE, W.; WARNER, M. G. High-Performance, Superparamagnetic, Nanoparticle-Based Heavy Metal Sorbents for Removal of Contaminants from Natural Waters. **ChemSusChem**, v. 3, n. 6, p. 749–757, 12 maio 2010.

WU, W.; NI, X.; SHAO, P.; GAO, H. Novel packaging film for humidity-controlled manipulating of ethylene for shelf-life extension of *Agaricus bisporus*. **LWT**, v. 145, p. 111331, jun. 2021.

WYRWA, J.; BARSKA, A. Innovations in the food packaging market: active packaging. **European Food Research and Technology**, v. 243, n. 10, p. 1681–1692, 1 out. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00217-017-2878-2>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

YILDIRIM, S.; RÖCKER, B.; PETTERSEN, M. K.; NILSEN-NYGAARD, J.; AYHAN, Z.; RUTKAITE, R.; RADUSIN, T.; SUMINSKA, P.; MARCOS, B.; COMA, V. Active Packaging

Applications for Food. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 17, n. 1, p. 165–199, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1541-4337.12322>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

YIN, W.; QIU, C.; JI, H.; LI, X.; SANG, S.; MCCLEMENTS, D. J.; JIAO, A.; WANG, J.; JIN, Z. Recent advances in biomolecule-based films and coatings for active and smart food packaging applications. **Food Bioscience**, v. 52, p. 102378, 1 abr. 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212429223000299>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

YOO, H. S.; KIM, T. G.; PARK, T. G. Surface-functionalized electrospun nanofibers for tissue engineering and drug delivery. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 61, n. 12, p. 1033–1042, out. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169409X09002324>>.

ZEINALI, T.; ALEMZADEH, E.; ZARBAN, A.; KHORASHADIZADEH, M.; ANSARIFAR, E. Fabrication and characterization of jujube extract-loaded electrospun polyvinyl alcohol nanofiber for strawberry preservation. **Food Science & Nutrition**, v. 9, n. 11, p. 6353–6361, 1 nov. 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.2601>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

ZHANG, J.; CHENG, D.; WANG, B.; KHAN, I.; NI, Y. Ethylene Control Technologies in Extending Postharvest Shelf Life of Climacteric Fruit. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 34, p. 7308–7319, 30 ago. 2017. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.7b02616>>. Acesso em: 29 jan. 2023.

ZHANG, J.; HUANG, X.; ZHANG, J.; LIU, L.; SHI, J.; MUHAMMAD, A.; ZHAI, X.; ZOU, X.; XIAO, J.; LI, Z.; LI, Y.; SHEN, T. Development of nanofiber indicator with high sensitivity for pork preservation and freshness monitoring. **Food Chemistry**, v. 381, p. 132224, jul. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814622001856>>.

SEGUNDA PARTE: ARTIGOS

ARTIGO 1: Desenvolvimento de nanofibras de poli(álcool vinílico) incorporadas com extratos vegetais aquosos por fiação por sopro de solução e sua aplicação como revestimento de morangos

*Artigo elaborado segundo as normas da revista *Innovative Food Science and Emerging Technologies* – ISSN: 1466-8564

Hanna Elisia Araújo de Barros, Caio Vinicius Lima Natarelli, Ingrid Alves Santos, Lenilton Santos Soares, Elisângela Elena Nunes de Carvalho, Juliano Elvis de Oliveira, Marcelo Franco, Eduardo Valério de Barros Vilas Boas.

RESUMO

Objetivou-se produzir nanofibras de poli (álcool vinil) (PVA) em água (F_{Água}) e enriquecidas com extratos aquosos de polpa de açaí (F_{AP}), farelo de cacau (F_{CS}), casca de jabuticaba (F_{JP}) e resíduo de cenoura (F_{CR}) pela técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) e aplicá-las como revestimento em morangos. Os extratos aquosos se mostraram fontes de compostos bioativos com atividade antioxidante. As soluções poliméricas foram consideradas como pseudoplásticas, de acordo com o perfil reológico. As nanofibras apresentaram morfologia uniforme com diâmetros entre 352 (F_{Água}) e 504 (F_{JP}) nm, exibindo elevados teores de TPC e atividade antioxidante, e ao serem avaliadas quanto a fotoestabilidade da atividade antioxidante, mostraram-se estáveis por 31 dias. F_{JP} e F_{Água} foram aplicadas como revestimentos em morangos, retardando alterações na coloração, degradação do TPC e atividade antioxidante e a ocorrência de frutos impróprios durante o armazenamento (7 °C e 90% UR), quando comparados com os frutos controles (sem revestimento). Portanto, as nanofibras de PVA produzidas pelo SBS se mostraram viáveis e aplicáveis, sobretudo as com compostos bioativos, como uma alternativa de revestimentos ativos utilizados para aumentar a vida útil de morangos.

Palavras-chaves: Compostos bioativos; antioxidantes; nanomateriais; SBS; Pós-colheita; *shelf life*.

1. INTRODUÇÃO

Frutas e hortaliças, como os morangos, são sensíveis e, geralmente, suscetíveis a vários problemas de qualidade pós-colheita, incluindo alta perda de massa, danos mecânicos, amadurecimento excessivo, estresses oxidativos, escurecimento enzimático, entre outros distúrbios bioquímicos e fisiológicos (Herman et al., 2022; Riva et al., 2020). Dessa forma, o desenvolvimento de embalagens e revestimentos ativos para esses alimentos à base de polímeros com incorporação de compostos bioativos é de interesse da indústria alimentícia, tendo em vista que esses materiais permitem o aumento da vida útil e manutenção da qualidade nutricional, sensorial e microbiológica dos alimentos, além de colaborar com a segurança alimentar, pois podem reduzir perdas e desperdícios pós-colheita (Md Nor & Ding, 2020; Rodríguez-Félix et al., 2022; Sun et al., 2020). Sistemas de embalagens ativas têm sido fabricados por muitos métodos, como de *casting* (A. L. M. de Oliveira et al., 2023; do Lago et al., 2023), técnica *layer-by-layer* (Malvano et al., 2022), termo-compressão (Gaviria et al., 2021), entre outros.

Atualmente, novos nanomateriais, como as nanofibras obtidas a partir de soluções poliméricas, vêm sendo consideradas candidatas ideais para serem aplicados em embalagens ativas para alimentos, como as frutas e hortaliças (Shi et al., 2023). Quando comparadas a suas contrapartes macroscópicas, como os filmes convencionais, as nanofibras poliméricas possuem propriedades superiores, como eficiência na barreira microbiológica e taxa de transmissão adequada de vapor de água e gases, além de apresentarem a capacidade de controlar a liberação dos compostos bioativos ao longo do tempo, o que pode promover efeito antibacteriano e antioxidante de longa duração (Göksen et al., 2020; Shen et al., 2022; Shi et al., 2023). De modo geral, várias são as técnicas de fabricação de nanofibras, sendo eletrospinning a mais utilizada. Entretanto, a fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS) pode ser uma alternativa mais viável, pois não necessita do uso de campo elétrico, apresenta baixo custo e alta produtividade (Barhoum et al., 2019; Medeiros et al., 2009).

Dentre os polímeros que podem ser usados para a produção das nanofibras encontra-se o poli (álcool vinílico) (PVA), um polímero sintético, atóxico, excelente barreira contra oxigênio e odores, altamente solúvel em água, biodegradável e resistente a maioria dos solventes orgânicos (Baker et al., 2012; Vatanpour et al., 2023). O PVA também é classificado como seguro (GRAS) para entrar em contato direto com alimentos, assim como para ser consumido por humanos via oral (U.S. Food and Drug Administration, 2004, 2018), o que permite sua aplicação em embalagens e revestimentos comestíveis para alimentos. Além disso,

a obtenção por SBS de fibras uniformes a partir de uma solução de PVA em água é um desafio para a técnica de fiação, ainda pouco explorado (Santos et al., 2016). Logo, a aplicação de extratos aquosos vegetais como solvente pode limitar o processo, pois pode implicar no não alongamento das fibras.

Existe uma lacuna na literatura quanto a fiação por SBS utilizando solventes pouco voláteis, como extratos aquosos vegetais. Entretanto, eles são passíveis de serem explorados, o que pode levar à evolução dessa técnica de produção de nanofibras poliméricas. Além disso, estudos como esses podem também atender às políticas *Clean Label*, atreladas à segurança alimentar e dos alimentos, assim como à sustentabilidade quando, além de fontes convencionais, há utilização de coprodutos, subprodutos e resíduos agroindustriais na produção desses extratos vegetais incorporados à materiais de embalagens de alimentos.

Dessa forma, o presente estudo objetivou avaliar o processo de obtenção, pela técnica de SBS, nanofibras de PVA a partir de água e de extratos aquosos pouco voláteis de diferentes fontes vegetais (polpa de açaí, farelo de cacau, cascas de jabuticaba e resíduos do processamento de cenoura), bem como, caracterizar e avaliar o desempenho das nanofibras obtidas como revestimento para morangos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Obtenção da matéria-prima

O poli (álcool vinílico) (PVA) (POVAL 32-97KL) foi fornecido pela empresa Kuraray America Inc. (Houston, USA). O farelo de cacau (*Theobroma cacao* L.) torrado foi cedido por indústrias de chocolate localizadas no município de Ilhéus-BA, Brasil. A polpa de açaí (*Euterpe oleracea*) liofilizada foi adquirida de empresas processadoras de polpas de frutas localizadas no município de Castanhal-PA, Brasil. Cascas de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) foram obtidas de frutos produzidos em Lavras-MG, Brasil e o resíduo do processamento mínimo de cenouras laranja (*Daucus carota* L.) (casca e talo) extraído de raízes adquiridas no comércio varejista de Lavras-MG, Brasil. Cada parcela experimental foi constituída por cerca de 6 kg de matéria prima. O processamento das matérias primas vegetais foi realizado no Laboratório de Pós-colheita de Frutas e Hortaliças da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, Brasil.

As cenouras e as jabuticabas foram selecionadas, lavadas em água corrente, para sua limpeza completa, e sanitizadas por imersão em solução de hipoclorito de sódio à 100 ppm por 15 min. Em seguida, foram descascadas, sendo os talos e cascas das cenouras e as cascas das jabuticabas secos em estufa com circulação de ar à 45 °C por 48 h. Para a padronização da

granulometria, as cascas das jaboticabas e o resíduo de cenouras laranjas, assim como o farelo de cacau e polpa de açaí liofilizada, foram processados utilizando um moinho multiuso (modelo TE-631/4, Tecnal, Brasil) e peneirados em malha de 35 mesh, até obtenção de farinhas homogêneas. Todas as farinhas foram acondicionadas em potes plásticos e armazenadas sob refrigeração ($8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) e ao abrigo de luz até a produção de seus respectivos extratos aquosos.

Os morangos (*Fragaria x ananassa* D.), da variedade San Andreas, utilizados para aplicar as nanofibras foram da linha gourmet, colhidos e doados pela empresa Frutas & Verduras[®]. Já as embalagens de polipropileno foram adquiridas de fornecedores padrão.

2.2. Produção dos extratos aquosos vegetais

2.2.1. Delineamento experimental 1

Este experimento foi conduzido utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) simples, constituído por quatro extratos aquosos, farelo de cacau (E_{CS}), polpa do açaí (E_{AP}), cascas de jaboticaba (E_{JP}) e resíduo do processamento mínimo de cenoura laranja (E_{CR}).

2.2.2. Preparação dos extratos aquosos

Os extratos vegetais, obtidos em triplicata, foram preparados conforme metodologia descrita por de Barros et al. (2020), com modificações. Para cada extrato, foram homogeneizados 8 g das farinhas das diferentes fontes vegetais em 100 mL de água destilada. Em seguida, os homogenatos foram levados para o banho ultrassônico por 30 min à 25 °C, filtrados em papel filtro Whatman n°1 e padronizados com $1,0 \pm 0,1\%$ de sólidos solúveis usando refratômetro digital (PR 101, Palette Series, Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) com compensação de temperatura automática à 25 °C. Por fim, foram armazenados em frascos de vidro âmbar a -18 °C até serem analisados quanto aos teores de matéria seca, compostos fenólicos totais e atividade antioxidante (método do β -caroteno/ácido linoleico e do radical DPPH^{*+}), assim como para sua utilização na produção das fibras.

2.3. Caracterização dos extratos aquosos vegetais

2.3.1. Teor de matéria seca do extrato (MS)

Para a determinação do teor de matéria seca, 100 mL de cada extrato vegetal foi pesado, congelados a -80 °C e liofilizados (liofilizador Christ Alpha 1-2 LDplus – Alemanha), por 72

horas à -40 °C. Em seguida, os extratos foram pesados novamente e o teor de matéria seca foi calculado conforme a Eq. (1).

$$\%MS_E = \left(\frac{m_S}{m_{in}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo,

$\%MS_E$ = Teor de matéria seca presente nos extratos aquosos vegetais;

m_{in} = Massa integral dos extratos antes da secagem;

m_S = Massa seca do extrato vegetal.

2.3.2. Teor de compostos fenólicos totais (TPC)

A determinação do teor de compostos fenólicos totais (TPC) foi realizada utilizando os extratos aquosos vegetais padronizados, por meio da metodologia do Fast Blue conforme descrito por Medina (2011). As leituras foram realizadas em um leitor de microplacas (EZ Read 2000) e os resultados expressos em mg equivalente de ácido gálico (EAG) 100 mL⁻¹ de extrato aquoso vegetal.

2.3.3. Determinação da atividade antioxidante: ensaios do β -caroteno/ácido linoleico e do radical DPPH^{*+} (2,2- difenil-1-picril-hidrazil)

A atividade antioxidante pelo método do β -caroteno/ácido linoleico foi determinada conforme descrito por Rufino et al. (2010), na qual utilizou-se diretamente os extratos aquosos vegetais padronizados e os resultados foram apresentados em porcentagem de inibição da oxidação (% de proteção).

A determinação pelo ensaio de captura de radicais DPPH^{*+} foi realizado conforme descrito por Brand-Williams et al. (1995), com modificações. A mistura reacional foi constituída de 7,5 μ L de extrato vegetal aquoso padronizado e 292,5 μ L de uma solução etanólica de DPPH^{*+} (6×10^{-2} mM). Decorridas 1 hora, as leituras foram realizadas em um leitor de microplacas (EZ Read 2000) à 515 nm e o branco sendo o etanol (P.A). A capacidade de reduzir o radical DPPH^{*+} (% de atividade antioxidante ou %AA) foi calculada utilizando-se na equação a seguir:

$$\%AA = \left(\frac{A_{Controle} - A_{Amostra}}{A_{Controle}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Sendo,

A_{Controle} = Absorbância da solução de DPPH inicial;

A_{Amostra} = Absorbância da mistura reacional após 1 hora.

2.4. Produção das fibras poliméricas

2.4.1. Delineamento experimental 2

Este experimento foi conduzido utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) simples, constituído por cinco nanofibras poliméricas (PVA), sendo uma controle e quatro enriquecidas com cada um dos extratos aquosos vegetais.

2.4.2. Solução polimérica

As soluções poliméricas (SP) na concentração de 12% (m/v) foram obtidas a partir da diluição do PVA em água destilada ($SP_{\text{Água}}$) e nos extratos aquosos das diferentes fontes vegetais (SP_{CS} , SP_{AP} , SP_{JP} e SP_{CR}) padronizados ($1,0 \pm 0,1$ °Brix), sob o aquecimento em banho maria à 90 °C e em agitação magnética por 50 minutos. As soluções poliméricas completamente solubilizadas foram transferidas, individualmente, para uma seringa de 20 mL e conectadas ao sistema de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS).

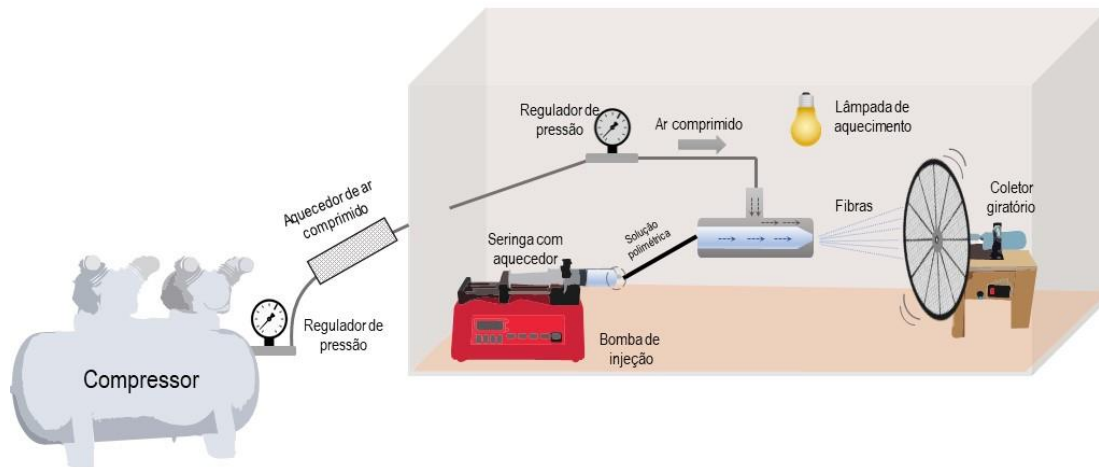
2.4.3. Reologia das soluções poliméricas

A reologia das soluções poliméricas foi feita utilizando um reômetro Anton Paar, modelo Physica MCR301, com geometria de cilindros concêntricos. As viscosidades das soluções foram medidas entre as taxas de cisalhamento de 1 a 500 s^{-1} sob uma temperatura de 45 °C.

2.4.4. Fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS)

As fibras poliméricas de PVA em água ($F_{\text{Água}}$) e nos extratos aquosos padronizados de farelo de cacau (F_{CS}), polpa de açaí liofilizado (F_{AP}), cascas de jabuticaba (F_{JP}) e resíduos de cenoura (F_{CR}) foram produzidas a partir da técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS), utilizando suas respectivas soluções poliméricas ($SP_{\text{Água}}$, SP_{CS} , SP_{AP} , SP_{JP} e SP_{CR}) e o aparato padrão descrito por Medeiros et al. (2009), com algumas modificações (Figura S1).

Figura S1 – Esquema da configuração adaptada da técnica de fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS).



O sistema de SBS consistiu em um bocal concêntrico constituído por uma peça interna, alimentada pela solução polimérica e outra externa, alimentada por ar pressurizado gerado por um compressor (CHIAPERINI MC 12 BPV 150L). O método foi adaptado, utilizando-se solução polimérica e ar pressurizado aquecidos com temperaturas controladas. No processo de fiação, a distância de protusão do bocal interno em relação ao externo utilizada foi de 15 mm. O controle da taxa de alimentação da solução polimérica foi realizado por uma bomba de seringa (NE - 300; New Era Pump Systems), sendo que a taxa de injeção da solução polimérica aplicada foi de 4 mL h^{-1} e a pressão do ar foi 70 Psi. A umidade do ambiente foi mantida em $41 \pm 1 \%$ e as temperaturas do ambiente, da seringa de plástico contendo a solução polimérica e do ar pressurizado foram $37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Além disso, um coletor circular fabricado a partir de uma tela de arame (malha 4) com aro de plástico (55 cm de diâmetro), sob rotação, foi colocado a uma distância de trabalho (WD) de 40 cm em relação ao bocal concêntrico. Por fim, as fibras produzidas foram armazenadas em potes herméticos, sob refrigeração à $8 \text{ }^\circ\text{C}$ e ao abrigo de luz até a realização das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e atividade antioxidante pelo método do radical DPPH^{*+}; nas fibras enriquecidas com os extratos aquosos também foram determinados os teores de compostos fenólicos totais e a atividade antioxidante pelo método do β -caroteno/ácido linoleico.

2.5. Caracterização das fibras poliméricas

2.5.1. Estimativa da porcentagem de incorporação dos extratos vegetais nas fibras poliméricas

A estimativa da porcentagem de incorporação dos extratos vegetais em suas respectivas fibras poliméricas baseou-se nos valores obtidos na determinação da %MS_E dos extratos vegetais, de acordo com a Eq. (3).

$$\%IE_F = \left[\frac{\%MS_E}{(\%MS_E + \%P)} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Sendo,

%IE_F = Estimativa da porcentagem de incorporação dos extratos vegetais;

%MS_E = Teor de matéria seca presente nos extratos aquosos vegetais;

%P = Porcentagem de polímero utilizado na solução polimérica.

2.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As fibras foram produzidas por 10 min para se obter mantas finas que permitissem a visualização e medição do diâmetro das fibras isoladamente. As coberturas em ouro foram realizadas utilizando o aparelho sputtering (Balzers SCD 050) e as observações realizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura FEG de ultra alta resolução (UHR) (Tescan-Clara, Czech Republic), nas condições de 5 keV, 90 pA com distância de trabalho de 10 mm. Os diâmetros das fibras foram avaliados por meio do software Image J (National Institutes of Health, USA), sendo que para cada amostra o diâmetro médio e sua distribuição foram determinados a partir da análise de pelo menos 100 fibras escolhidas aleatoriamente.

2.5.3. Caracterização por Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR foi empregada para examinar a presença de grupos funcionais dos compostos orgânicos contidos nas fibras poliméricas, bem como avaliar a incorporação dos extratos vegetais pelo polímero, ao comparar com o FTIR realizado nos extratos vegetais liofilizados. Para isso, utilizou-se um espectrômetro FT-IR Varian 600-IR com transformada de Fourier (FTIR), com acessório GladiATR da Pike Technologies acoplado para medidas por reflectância total atenuada (ATR)

a 45° com cristal de seleneto de zinco. Utilizou-se a faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1} , a partir de 32 varreduras à 4 cm^{-1} .

2.5.4. Determinações de TPC e da atividade antioxidante (β -caroteno/ácido linoleico) das fibras poliméricas

Para as determinações foram obtidos, em triplicata, extratos das diferentes fibras poliméricas, utilizando 0,25 g das fibras em 100 mL de água destilada. As misturas ficaram sob constante agitação em uma mesa agitadora por 1 hora. Em seguida, foram levadas para o banho ultrassônico por 30 min, à 25 °C. Passado o tempo, os extratos foram filtrados, por duas vezes, em tecido de organza e armazenados em frascos de vidro âmbar a -18 °C até a realização das determinações de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante pelo método do β -caroteno/ácido linoleico, conforme já descritos, sendo os resultados expressos em mg equivalente de ácido gálico (EAG) 100 g^{-1} de fibras e em % de proteção, respectivamente.

2.5.5. Avaliação da fotodegradação da atividade antioxidante durante o armazenamento das fibras poliméricas

Para a avaliação da fotodegradação da atividade antioxidante, 0,15 g de fibras poliméricas controle e de fibras com seus respectivos extratos vegetais foram moldadas e prensadas em forma de disco com 2 cm de diâmetro e espessura média de $3,65 \pm 0,20$ cm. Em seguida, os discos de fibras foram mantidos em incubadora BOD STAR FT 270 L (Fortinox) sob radiação de luz visível (400 W), com intervalo de 12 h.dia⁻¹ com e sem luz, à 25 °C por um período de 31 dias. Para a quantificação da atividade antioxidante utilizou-se o ensaio de captura de radicais DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil), conforme descrito por Brand-Williams et al. (1995), com modificações e, neste caso, a mistura reacional foi constituída por um disco de fibras poliméricas submerso em 5 mL de uma solução etanólica de DPPH (6×10^{-2} mM), sendo 1 hora o tempo de reação. A capacidade de reduzir o radical DPPH^{•+} (% de atividade antioxidante ou %AA) também foi calculada conforme a Eq. (1) e as medições da atividade antioxidante das fibras foram determinadas logo após a produção (t_0) e após 11 (t_1), 21 (t_2) e 31 (t_3) dias de armazenamento, em triplicata.

2.6. Aplicação das nanofibras em morangos

2.6.1. Delineamento experimental 3

O delineamento aplicado nesta etapa foi o inteiramente casualizado (DIC) fatorial 3x5, constituído por três tratamentos (morangos sem revestimento e com revestimento das nanofibras controle de PVA e daquelas contendo o extrato vegetal escolhido) e por 5 tempos de armazenamentos (0, 3, 6, 9 e 12 dias).

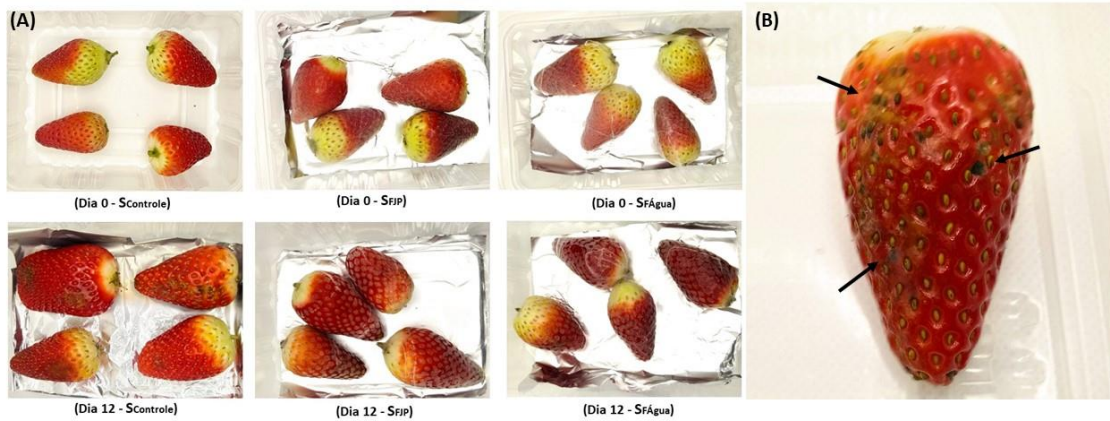
2.6.2. Revestimento dos frutos

Para aplicação como revestimento, utilizou-se as nanofibras de PVA controle ($F_{\text{Água}}$) e o tratamento de nanofibra de PVA contendo extrato das cascas de jaboticabas (F_{JP}) que mais se destacou na maioria nas determinações analíticas realizadas.

Uma vez colhidos, os morangos foram imediatamente levados, em transporte refrigerado, para a Planta Piloto de Processamento Mínimo de Vegetais do Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Lavras-MG. Inicialmente, os frutos foram pré-resfriados em banho de gelo à 0 °C por 10 min e sanitizados, com solução de hipoclorito de sódio (50 ppm) por 15 min. Após serem drenados à temperatura ambiente (25 °C) e removidas suas sépalas, os frutos foram divididos em três grupos, de acordo com os tratamentos; frutos controles sem revestimento (S_{Controle}); frutos revestidos com as nanofibras de PVA controle ($S_{F_{\text{Água}}}$) e frutos revestidos com as nanofibras de PVA com o extrato das cascas de jaboticaba ($S_{F_{\text{JP}}}$) acondicionados em embalagem (3,5 x 11,5 x 15 cm) rígida de polipropileno, com tampa de encaixe. Para cada tempo de avaliação foram utilizadas 3 embalagens por tratamento.

Para o revestimento, 4 morangos (quantidade equivalente para uma batelada) foram espetados no coletor giratório e a fiação ocorreu por 10 min., sobre cada lado da superfície dos frutos, totalizando 20 min de fiação por fruto. Os frutos sem revestimento foram mantidos sob as mesmas condições que os frutos revestidos. Sendo assim, em cada embalagem foram acondicionados grupos de 4 frutos e, em seguida, armazenados em câmara fria à 7 ± 2 °C e 90 ± 5 % de umidade relativa (UR). As análises foram realizadas a cada 3 dias, pelo período de 12 dias (Figura S2 A).

Figura S2 – Morangos usados no experimento (A) sem revestimento (S_{Controle}) e os revestidos com as nanofibras de PVA controle ($S_{F_{\text{Água}}}$) e as com o extrato aquoso das cascas de jaboticaba ($S_{F_{\text{JP}}}$) no dia 0 (zero) e no último dia de armazenamento (dia 12) e (B) como exemplo de deterioração visual do fruto.



2.6.3. Perda de massa

A perda de massa dos frutos ao longo do tempo foi avaliada por meio de pesagem em balança analítica, considerando o peso inicial dos frutos (0 dia) e o peso dos frutos no tempo de armazenamento avaliado (Eq. 4). Embalagens exclusivas para a análise foram utilizadas, sendo pesadas sempre as mesmas amostras, a cada tempo de avaliação.

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left[\frac{(m_i - m_f)}{m_i} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Sendo,

m_i = massa inicial (0 dia);

m_f = massa final (correspondente a cada tempo de armazenamento avaliado).

2.6.4. Parâmetros de cor

A análise de coloração dos morangos foi realizada com auxílio do colorímetro Konica Minolta CR-400, iluminante D65, com determinação das variáveis L^* , a^* , b^* e ângulo Hue. Para a realização das leituras, as nanofibras foram retiradas das superfícies dos morangos que as continham e foram realizadas em pontos distintos da região equatorial dos frutos. Os valores de a^* , b^* e L^* em seus respectivos tempos de armazenamento (0, 3, 6, 9 e 12 dias) foram utilizados para o cálculo do índice de escurecimento (Browning index - BI) conforme descrito nas Eq. (5) e Eq. (6). Já o índice de coloração total (ΔE) (Eq. (10)) foi calculado por meio das variações (ΔL^* , Δa^* e Δb^*) das variáveis a^* , b^* e L^* em seus respectivos tempos de armazenamento (3, 6, 9 e 12 dias) quando comparados o dia 0 (L_0^* , a_0^* e b_0^*), conforme as Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (9) (Muley & Singhal, 2020).

$$x = \frac{[a^* + (1,75 \times L^*)]}{[(5,645 \times L^*) + a^* - (3,021 \times b^*)]} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$BI = \frac{[100 \times (x - 0,310)]}{0,172} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Eq. (10)}$$

2.6.5. Determinações de TPC e da atividade antioxidante (β -caroteno/ácido linoleico e radical DPPH^{*+}) dos frutos

Para cada extrato, 5 g do tecido congelado dos frutos foram homogeneizados com 25 mL de água destilada. As misturas ficaram sob constante agitação em uma mesa agitadora por 1 hora (25 °C). Em seguida, foram levadas para o banho ultrassônico por 30 min, à 25 °C. Passado o tempo, os extratos foram filtrados em tecido de organza e papel filtro Whatman n°1. Posteriormente, foram armazenados em frascos de vidro âmbar, ao abrigo de luz e a -18 °C até a realização das determinações de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante pelos métodos do β -caroteno/ácido linoleico e do radical DPPH^{*+}, conforme já descritos, sendo os resultados expressos em mg equivalente de ácido gálico (EAG). 100 g⁻¹ de fruto, em % de proteção e em % AA, respectivamente.

2.6.6. Determinação visual de frutos impróprios para consumo

O percentual de frutos impróprios para consumo foi calculado segundo a Eq. (11) e contabilizado para cada tempo de avaliação, considerando a razão entre o número total de frutos (T_f) e o número total de frutos com algum tipo de dano visível (I_f), conforme descrito por Carvalho do Lago et al. (2023). Levando em consideração que em cada embalagem foram armazenados 4 (quatro) morangos, cada tratamento com três repetições, no mesmo tempo de armazenamento, continha um total de 12 frutos (T_f). Foram consideradas como alterações a presença de áreas acastanhadas, áreas amolecidas e crescimento visível de micélio fúngico, como está exemplificado na Figura S1 (B).

$$\text{Frutos impróprios (\%)} = \frac{(I_f \times 100)}{T_f} \quad \text{Eq. (11)}$$

2.7. Análise Estatística

A produção dos extratos vegetais e das nanofibras poliméricas, assim como a aplicação como revestimento em morangos e todas as determinações analíticas foram realizadas em, no mínimo, 3 repetições e em triplicata. Os dados relativos à caracterização dos extratos aquosos vegetais, relativas à caracterização e avaliação da fotodegradação da atividade antioxidante das nanofibras poliméricas, com exceção dos resultados do perfil reológico das soluções poliméricas e FTIR, assim como resultados da aplicação das fibras nos frutos, com exceção da porcentagem de frutos impróprios, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo as médias, quando significativas, comparadas pelo teste de média de Scott-knott com 5% de significância utilizando o software R versão 4.0.2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização dos extratos vegetais

Antes das elaborações das micro e nanofibras poliméricas de PVA, avaliou-se o potencial dos extratos aquosos obtidos a partir de farelo de cacau (E_{CS}), polpa de açaí (E_{AP}), cascas das jabuticabas (E_{JP}) e resíduo de cenouras laranjas (E_{CR}) como fontes alternativas e naturais de compostos bioativos e com atividade antioxidante a serem incorporadas pelas fibras poliméricas.

Na Tabela 1 estão expostos os valores relativos às determinações dos teores de matéria seca (MS_E), de compostos fenólicos totais (TPC) e atividades antioxidantes (β -Caroteno e DPPH^{*+}) dos extratos aquosos vegetais padronizados. Observou-se que os teores de MS_E variaram de 0,67 a 1,24 %, o menor valor correspondente aos extratos vegetais de E_{AP} e o maior aos de E_{JP} , não havendo, entretanto, diferenças significativas entre os extratos, pelo teste de média de Scott Knott ($p > 0,05$) (Tabela 1). Sabe-se que grande parte da matéria seca de matérias-primas de origem vegetal é composta por açúcares e outros compostos solúveis, além de amido, em muitos casos pode ser diretamente relacionada com o teor de sólidos solúveis (principalmente os açúcares e compostos bioativos solúveis) (Burdon et al., 2004; Escribano et al., 2017). Assim, pode-se inferir que a padronização dos extratos em $1,0 \pm 0,1$ °Brix foi efetiva.

Tabela 1 – Médias das análises de teor de matéria seca (MS_E) de compostos fenólicos totais (TPC) e atividades antioxidantes (β -Caroteno e DPPH^{*+}) dos extratos aquosos padronizados do farelo de cacau (E_{CS}), polpa de açaí (E_{AP}), cascas das jabuticabas (E_{JP}) e do resíduo de cenouras laranjas (E_{CR}).

Extrato	Teor de matéria seca (% de MS_E)	TPC (mg EAG 100 ⁻¹ mL)	β -Caroteno (% de proteção)	DPPH ^{*+} (%AA)
E_{CS}	0,86 ^a	129,09 ^b	93,70 ^a	89,50 ^a
E_{AP}	0,67 ^a	238,58 ^a	85,95 ^a	86,54 ^a
E_{JP}	1,24 ^a	45,38 ^c	93,04 ^a	94,22 ^a
E_{CR}	0,80 ^a	18,38 ^d	80,87 ^b	37,38 ^b

**Médias seguidas de letras minúscula iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5% de significância ($p > 0,05$); MS_E = Matéria seca do extrato vegetal; EAG = Equivalente de Ác. Gálico; AA = Atividade antioxidante.

Quanto aos TPCs, foi possível observar que os extratos vegetais diferiram estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$), sendo os oriundos de E_{CR} (18,38 mg EAG 100⁻¹ mL) e E_{AP} (238,58 mg EAG 100⁻¹ mL) os que apresentaram o menor e o maior teores de compostos fenólicos, respectivamente (Tabela 1). O método Fast Blue (Medina, 2011) foi adotado por ser considerado mais específico na determinação de fenólicos que o tradicional método de Folin Ciocalteu. Devido ao acoplamento específico do grupo diazônio do reagente Fast Blue a um anel aromático com grupos hidroxila, característico dos fenólicos, há a formação de complexos azo estáveis passíveis de serem determinados espectrofotometricamente, reduzindo as chances de superestimação dos fenólicos, como acontece, normalmente, no método de Folin Ciocalteu.

A atividade antioxidante dos extratos aquosos vegetais foi avaliada utilizando dois métodos distintos (β -caroteno/ácido linoleico e radical DPPH^{*+}) quanto aos seus mecanismos de ação nas mais variadas matrizes alimentares (Choi et al., 2002; Prior & Cao, 2000). Para ambas as metodologias aplicadas, observou-se o extrato vegetal de E_{CR} apresentou a menor atividade antioxidante, em comparação aos demais extratos, que não diferiram entre com base no teste de Scott-knott ($p \leq 0,05$) (Tabela 1).

O método do β -caroteno/ácido linoleico tem como base a oxidação de β -caroteno (descoloração) induzida pelos produtos da degradação oxidativa do ácido linoleico. Dessa forma, a atividade antioxidante deste método pode ser classificada como alta quando o percentual de inibição de oxidação for maior que 70 %, intermediária quando estiver entre 40 e 70 % e baixa quando for menor que 40 % (Rufino et al., 2010). Apesar da menor atividade antioxidante observada no extrato de E_{CR} , ele ainda apresentou alta capacidade de inibir a oxidação do β -caroteno, com 80,87 % de proteção (Tabela 1). Assim, todos os extratos

estudados podem ser classificados como com alta atividade antioxidante, de acordo com o método do β -caroteno/ácido linoleico.

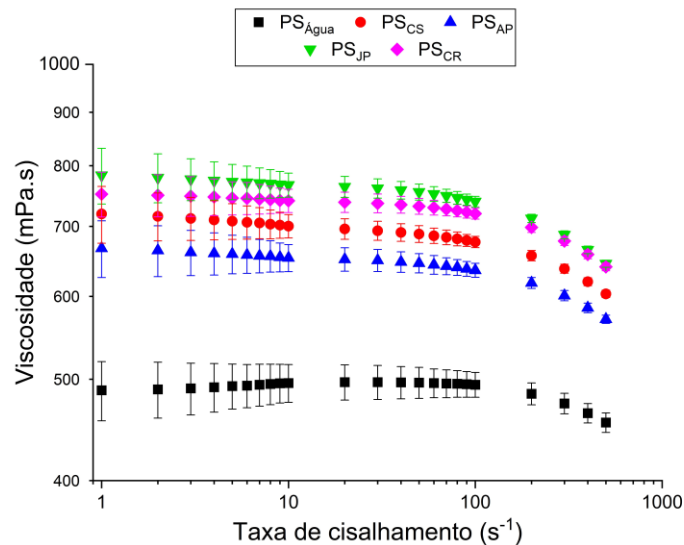
A determinação pelo radical DPPH^{*+} fundamenta-se na redução do radical DPPH^{*+} (2,2-difenil-1-picril-hidrazil) por antioxidantes presentes nos extratos, provocando, conseqüentemente, o decréscimo da absorbância da mistura reacional (Schaich et al., 2015). Os extratos aquosos de E_{JP}, E_{AP} e E_{CS} apresentaram os maiores percentuais de atividade antioxidante, em função da maior capacidade de capturar radicais livres por meio da captura do átomo de H no DPPH^{*+}, entre 86,54 e 94,22 %AA, em comparação ao extrato aquoso de E_{CR}, com 37,38 %AA (Tabela 1).

As diferenças dos valores encontrados nas determinações de TPC e de atividades antioxidantes, entre os diferentes extratos vegetais (Tabela 1), podem ser explicadas e atribuídas à presença e concentração de diferentes compostos bioativos com capacidades antioxidantes distintas, os quais interagem uns com os outros, podendo atuar de forma sinérgica ou inibitória (Andzi Barhé & Feuya Tchouya, 2016; de Menezes et al., 2021; Salcedo et al., 2010). Portanto, pode-se inferir que os extratos aquosos obtidos a partir do E_{CS}, E_{AP}, E_{JP} e E_{CR} podem ser utilizados como fontes alternativas e naturais de compostos bioativos e com potencial atividade antioxidante para a produção de micro e nanofibras poliméricas de PVA.

3.2. Caracterização da reológica das soluções poliméricas

Visando-se a produção de nanofibras, soluções poliméricas de PVA diluídas em água e nos extratos de E_{CS}, E_{AP}, E_{JP} e E_{CR}, na concentração de 12 % (m/v), foram elaboradas. Os perfis reológicos dessas soluções foram estudados, visto poder interferir na obtenção e na morfologia das nanofibras. A caracterização reológica das soluções poliméricas foi realizada a 45 °C e com taxa de cisalhamento variando de 1 a 500 s⁻¹ (Figura 1). Observa-se que a solução de poli (álcool vilínico) (PVA) em água (PS_{Água}), assim como as soluções de PVA em seus respectivos extratos aquosos vegetais (PS_{CS}, PS_{AP}, PS_{JP} e PS_{CR}), apresentaram redução da viscosidade com o aumento da força de cisalhamento, a partir da taxa de cisalhamento de 100 s⁻¹. Esse comportamento é típico de soluções poliméricas pseudoplásticas, também conhecido como o fenômeno *shear thinning* (Oliveira et al., 2012). Sob baixas taxas de cisalhamento (1 e 100 s⁻¹), as soluções apresentaram viscosidade constante, que remete ao comportamento newtoniano (Oliveira et al., 2012).

Figura 1 – Perfil reológico das soluções poliméricas de poli (álcool vinílico) controle ($PS_{\text{Água}}$) e contendo os extratos de farelo de cacau (PS_{CS}), polpa de açaí (PS_{AP}), cascas das jabuticabas (PS_{JP}) e do resíduo de cenouras laranjas (PS_{CR}).



Ao comparar o perfil reológico da solução da amostra $PS_{\text{Água}}$ com as demais (PS_{CS} , PS_{AP} , PS_{JP} e PS_{CR}), nota-se que a utilização dos extratos aquosos vegetais em substituição à água promoveu o aumento da viscosidade (Figura 1). Esse fenômeno pode ser explicado devido aos extratos apresentarem em suas matrizes uma diversidade de componentes em quantidade e tamanhos moleculares diferentes, como por exemplo os açúcares, compostos fenólicos, antioxidantes solúveis, entre outros (Alasalvar et al., 2001; Melo et al., 2016; Oliveira et al., 2012; Quatrin et al., 2019; Rebollo-Hernanz et al., 2021). As composições diferentes dos extratos também explicam as diferenças nas viscosidades encontradas entre suas soluções, sendo a solução da amostra PS_{JP} a que apresentou maior viscosidade, seguida da PS_{CR} , PS_{CS} e PS_{AP} (Figura 1). Outro fato a ser considerado é que a presença dos extratos aquosos vegetais nas soluções pode causar possíveis interações entre as cadeias de polímeros e os componentes e constituintes químicos dos extratos. Tais interações podem promover restrições ao movimento da cadeia polimérica tendo em vista sua ação como um obstáculo para o fluxo, acarretando assim, no aumento na viscosidade (Oliveira et al., 2012).

3.3. Caracterização das fibras poliméricas

Fibras poliméricas controles ($F_{\text{Água}}$) e das contendo os extratos aquosos de farelo de cacau (F_{CS}), polpa de açaí (F_{AP}) e de jabuticabas (F_{JP}) e dos resíduos de cenouras (F_{CR}) foram produzidas pela técnica SBS, a partir das soluções poliméricas ($PS_{\text{Água}}$, PS_{CS} , PS_{AP} , PS_{JP} e PS_{CR}). Na Tabela 2 estão descritos os valores encontrados para a estimativa da porcentagem de

incorporação dos extratos vegetais nas fibras poliméricas (IE_F) e os resultados das determinações dos diâmetros, dos teores de compostos fenólicos totais (TPC) e da atividade antioxidante pelo método do β -Caroteno das fibras $F_{\text{Água}}$, F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR} . Dessa forma, quando aplicado o teste de Scott Knott a 5% de significância nos dados destas variáveis (Tabela 2), foram observados que pelo menos dois tratamentos de nanofibras incorporadas com os extratos vegetais não diferiram entre si ($p > 0,05$), no entanto, todos eles (F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}) diferiram estatisticamente ($p \leq 0,05$) da nanofibra controle ($F_{\text{Água}}$), conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da caracterização (Estimativa da porcentagem de incorporação dos extratos vegetais nas fibras poliméricas - IE_F ; valores dos diâmetros, teor de compostos fenólicos totais - TPC e atividade antioxidante pelo método do β -Caroteno) das nanofibras controle ($F_{\text{Água}}$) e das contendo os extratos de farelo de cacau (F_{CS}), polpa de açaí (F_{AP}), cascas das jabuticabas (F_{JP}) e do resíduo de cenouras (F_{CR}).

Variáveis	Nanofibras				
	$F_{\text{Água}}$	F_{CS}	F_{AP}	F_{JP}	F_{CR}
Incorporação dos extratos nas fibras poliméricas (% de IE_F)	0,00 ^b	6,97 ^a	5,33 ^a	8,50 ^a	6,86 ^a
Diâmetro das fibras (nm)	352,00 ^c	455,00 ^b	498,00 ^a	504,00 ^a	457,00 ^b
TPC (mg EAG.100 g⁻¹)	0,00 ^e	748,57 ^b	1384,79 ^a	286,75 ^c	124,43 ^d
β-Caroteno (% de proteção)	0,00 ^d	69,96 ^b	81,23 ^a	70,11 ^b	23,38 ^c

**Médias seguidas de letras minúscula iguais na mesma linha não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5% de significância ($p > 0,05$); EAG = Equivalente de Ácido Gálico; AA = Atividade antioxidante.

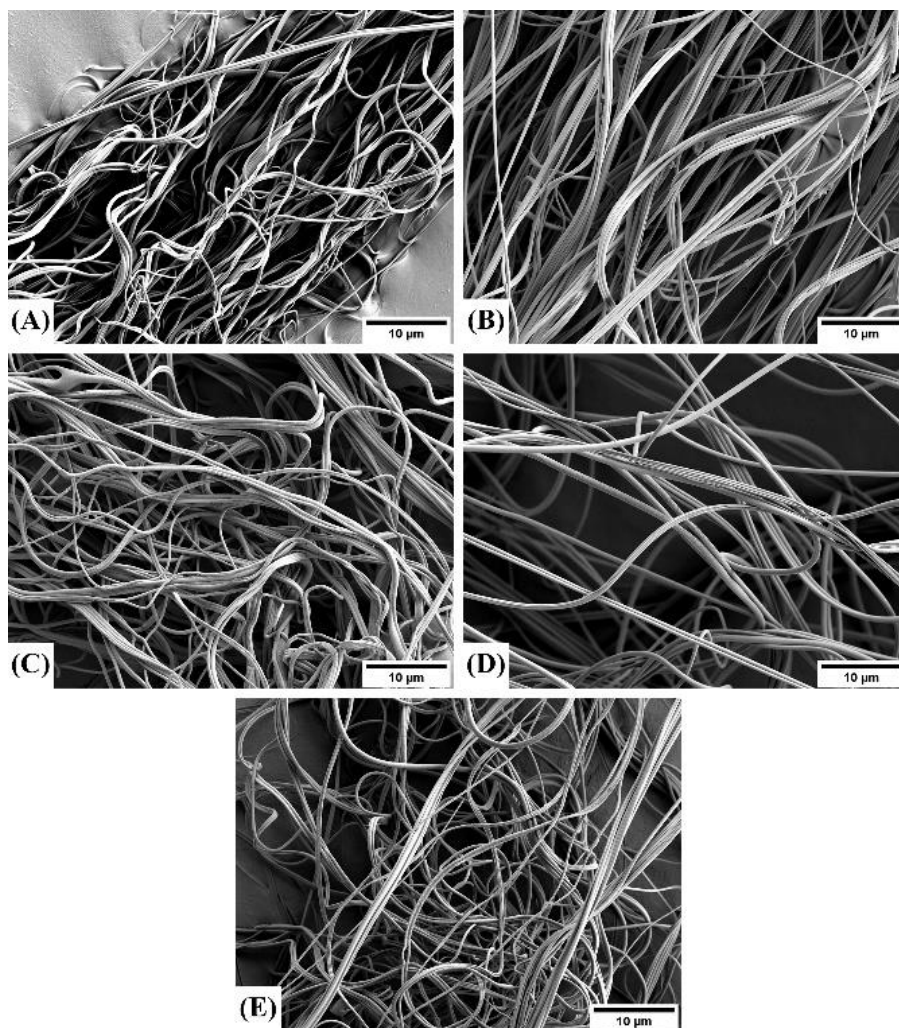
3.3.1. Estimativa da porcentagem de incorporação dos extratos vegetais nas fibras poliméricas (IE_F)

Os valores relativos às estimativas da porcentagem de incorporação dos extratos vegetais nas fibras poliméricas (IE_F) (Tabela 2), calculados por meio da Eq. (3), indicam o quanto, em porcentagem, de extrato vegetal possivelmente permaneceu e foi incorporado nas fibras poliméricas após a evaporação da fase líquida do extrato (água) durante o processo de fiação por SBS. A IE_F das amostras controle ($F_{\text{Água}}$) é zero, visto não terem sido submetidas à incorporação dos extratos vegetais aquosos. Já o IE_F das fibras poliméricas incorporadas de extratos vegetais variou de 5,33 a 8,50 %, amplitude ditada pelas amostras F_{AP} e F_{JP} , respectivamente.

3.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu a caracterização da morfologia (Figura 2) e do diâmetro (Tabela 2) das fibras controle ($F_{\text{Água}}$) e daquelas contendo os extratos vegetais (F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}).

Figura 2 – Micrografias das nanofibras poliméricas de (A) poli (álcool vinílico) controles ($F_{\text{Água}}$) e das contendo os extratos de (B) farelo de cacau (F_{CS}), (C) polpa de açaí (F_{AP}), (D) cascas das jabuticabas (F_{JP}) e do (E) resíduo de cenouras laranjas (F_{CR}).

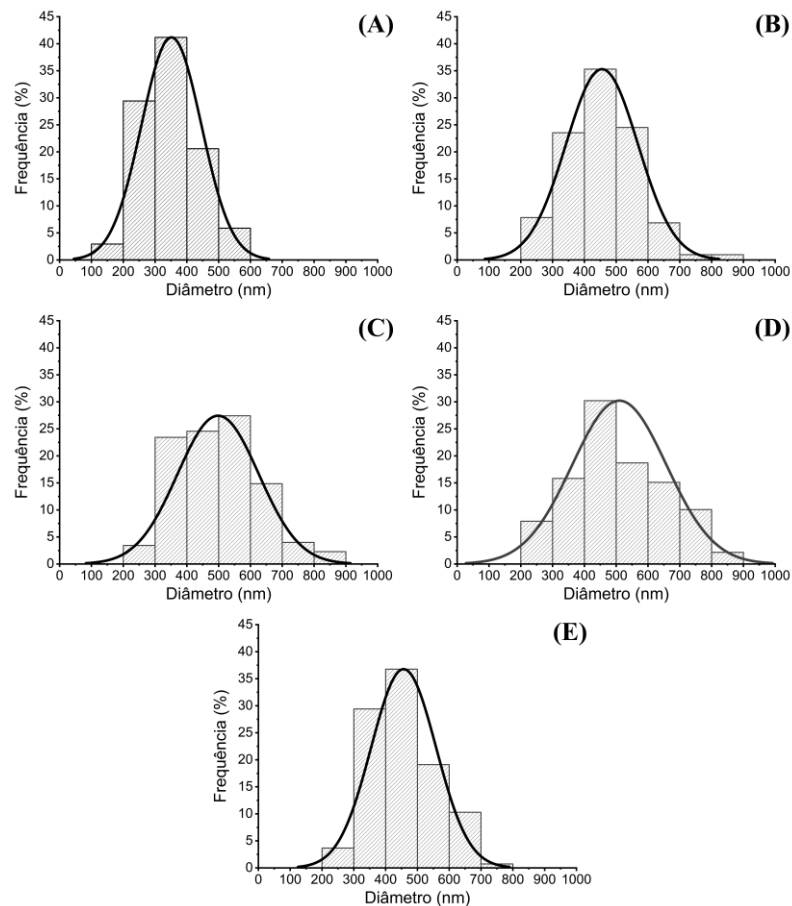


Em relação à morfologia, de acordo com as micrografias (Figura 2), observou-se que todas as fibras produzidas a partir de PVA ($F_{\text{Água}}$, F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}) apresentaram superfícies contínuas e lisas, com pouca presença de *beads*, indicando assim, que os parâmetros de fiação utilizados foram bem ajustados. Além disso, as fibras mostraram-se dispostas em um tipo de trama ordenada aleatoriamente, formando as mantas poliméricas. Assim, as micrografias

obtidas na magnitude de $10000 \times$ (Figura 2) permitem inferir que é viável a produção dessas fibras poliméricas ($F_{\text{Água}}$, F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}) por meio da fiação por SBS.

As fibras produzidas exibiram diâmetros médios entre 352 e 504 nm, pertencentes às amostras $F_{\text{Água}}$ e F_{JP} , respectivamente, conforme observado na Tabela 2. Considerando a variação do diâmetro apresentadas nos histogramas de tamanho das fibras produzidas (Figura S3), não há como afirmar de forma conteste que as incorporações dos extratos aquosos no polímero efetivamente promoveram o aumento no diâmetro das fibras. Entretanto, a diferença entre o diâmetro médio das fibras as contendo os extratos vegetais estudadas e a controle ($F_{\text{Água}}$) apontam um aumento médio no diâmetro das fibras, que não deve ser desprezado. Logo, o aumento médio no diâmetro das fibras foi de 103, 105, 146, 152 nm, referentes às amostras de fibras F_{CS} , F_{CR} , F_{AP} e F_{JP} , respectivamente. Fato este corroborado por Zeinali *et al.* (2021), pois também observaram o aumento do diâmetro das nanofibras de PVA eletrofiadas quando adicionado extrato vegetal ao polímero.

Figura S3 – Distribuição dos diâmetros das fibras poliméricas de (A) poli (álcool vinílico) controles ($F_{\text{Água}}$) e das contendo os extratos de (B) farelo de cacau (F_{CS}), (C) polpa de açaí (F_{AP}), (D) cascas das jabuticabas (F_{JP}) e do (E) resíduo de cenouras laranjas (F_{CR}).



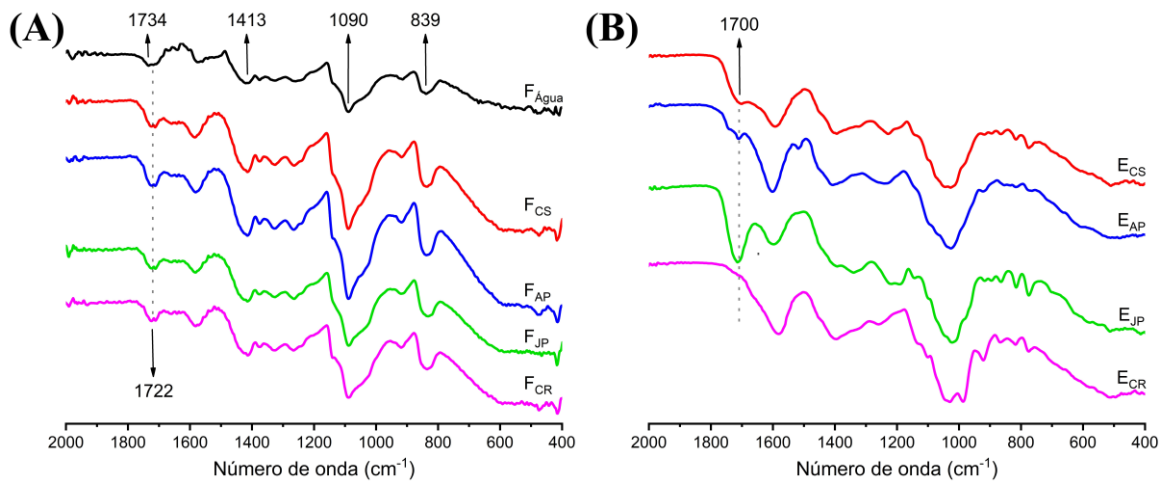
De acordo com Oliveira et al. (2011) a viscosidade da solução polimérica influencia diretamente na morfologia e nos diâmetros das fibras fiadas. Partindo-se desse pressuposto e ao relacionar a reologia das soluções poliméricas (Figura 1) com as médias de diâmetros das fibras encontrados (Tabela 2), pode-se associar o aumento na viscosidade das soluções poliméricas, promovido pelos extratos aquosos vegetais, com os aumentos médios nos diâmetros das fibras.

Além disso, também por meio da Figura S3, foi possível verificar que a maioria das fibras apresentou diâmetros entre 200 e 600 nm, sendo também produzidas fibras com 100 nm e poucas foram aquelas que ultrapassaram os 600 nm. Pelo exposto, e levando-se em consideração que dentro da ciência dos materiais e da nanotecnologia convencionou-se que as nanofibras podem ser consideradas como materiais unidimensionais (1D) com diâmetros inferiores a 1000 nm e relação de aspecto (ou seja, relação comprimento/diâmetro) maior que 50 nm (Huang et al., 2019), confirma-se que no presente estudo foram produzidas nanofibras poliméricas por meio da fiação por SBS.

3.3.3. Caracterização por Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 3 (A) estão dispostos os espectros obtidos a partir de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) das fibras produzidas com e sem extrato vegetal. Verificam-se, para todas as amostras ($F_{\text{Água}}$, F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}), bandas características do PVA em, aproximadamente, 1734, 1090, 1413 e 839 cm^{-1} , conforme destacado na Figura 3 (A). Tais bandas são referentes às vibrações de estiramento de C=O e de C-O provenientes de grupos acetato residuais no PVA, vibrações de dobramento de CH_2 e vibrações de estiramento de C-C, respectivamente (Kumar et al., 2014; Mansur et al., 2008). No entanto, também foi observado que a banda do espectro da nanofibra $F_{\text{Água}}$ localizada em, aproximadamente, 1734 cm^{-1} foi intensificada e deslocada para, aproximadamente, 1722 cm^{-1} , nos espectros das nanofibras com os extratos (F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}) (Figura 3 A).

Figura 3 – Espectros de FTIR das (A) nanofibras poliméricas de poli (álcool vinílico) controles ($F_{\text{Água}}$) e das contendo os extratos de farelo de cacau (F_{CS}), polpa de açáí (F_{AP}), cascas das jaboticabas (F_{JP}) e do resíduo de cenouras laranjas (F_{CR}) e dos (B) extratos aquosos padronizados e liofilizados do farelo de cacau (E_{CS}), polpa de açáí (E_{AP}), cascas das jaboticabas (E_{JP}) e do resíduo de cenouras laranjas (E_{CR}).



Ao se comparar os espectros de FTIR das fibras produzidas com e sem extrato vegetal (Figura 3 A) com os espectros dos extratos vegetais liofilizados, na faixa de comprimento de onda entre 400 a 2000 cm^{-1} (região de melhor visualização de picos relativos aos compostos fenólicos e derivados) (Figura 3 B), foi possível visualizar, nos extratos vegetais, a banda em, aproximadamente, 1700 cm^{-1} , que pode ser relacionada com a vibração do éster alifático α,β -insaturado ou ao estiramento da ligação $\text{C}=\text{O}$ de ácidos carboxílicos protonados (Baltacioğlu et al., 2021). Essa banda pode ser associada à presença do ácido clorogênico, um composto polifenólico bioativo comum em diversos vegetais e que representa todo um grupo éster-hidroxicinâmico e ácido quínico envolvendo os ácidos dicafeoil, cafeoil, cumaroilquínico e feruloil, respectivamente (Baltacioğlu et al., 2021; Nwafor et al., 2022).

Logo, a ocorrência da banda em, aproximadamente, 1722 cm^{-1} , destacada nos espectros das nanofibras com os extratos (Figura 3 A) pode estar associada com a combinação dos picos de 1734 (Figura 3 A) e 1700 cm^{-1} (Figura 3 B), indicando que houve uma possível interação entre o polímero e os compostos bioativos e que houve, de fato, a incorporação dos extratos vegetais nas fibras. Além disso, a presença de apenas essa semelhança entre os espectros das nanofibras incorporadas com os extratos e dos extratos vegetais pode ser explicada devido à baixa porcentagem de incorporação dos extratos vegetais nas fibras, entre 5,33 e 8,50 % (Tabela 2).

3.3.4. Determinações de TPC e da atividade antioxidante (β -caroteno/ácido linoleico)

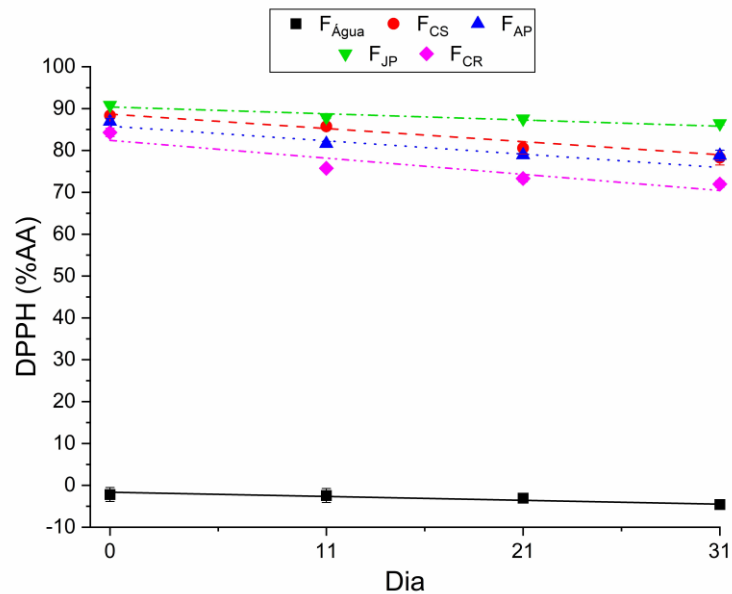
Os TPCs variaram entre 0 e 1384,79 mg EAG 100^{-1} g de fibra, nas nanofibras de PVA controle ($F_{\text{Água}}$) e F_{AP} , respectivamente (Tabela 2). Nanofibras F_{AP} apresentaram os maiores TPCs, seguidas de F_{CS} , F_{JP} e F_{CR} , em ordem decrescente de concentração. Salienta-se que todas as fibras obtidas a partir da incorporação dos extratos vegetais em PVA apresentaram teores de compostos fenólicos superiores à 100 mg EAG 100^{-1} g (Tabela 2). Já em relação à determinação da atividade antioxidante pelo método do β -caroteno/ácido linoleico (Tabela 2), foi possível verificar que as fibras $F_{\text{Água}}$ (controle) não apresentaram atividade antioxidante, sendo que as fibras F_{AP} e F_{JP} apresentaram alta capacidade de inibição da oxidação, com 81,23 e 70,11 % de proteção do β -caroteno, respectivamente. No caso das fibras F_{CS} , a atividade antioxidante está entre alta e intermediária, levando em consideração o desvio padrão encontrado ($69,96 \pm 2,40$ % de proteção). Já as fibras F_{CR} apresentaram baixo percentual de inibição de oxidação (23,38 %) (Tabela 2).

Pelo exposto e levando-se em consideração que os compostos fenólicos e seus derivados são os principais responsáveis pela atividade antioxidante de plantas, pode-se inferir que as incorporações dos extratos vegetais às fibras de PVA possibilitaram o desenvolvimento de nanomateriais carreadores de fenólicos e com atividade antioxidante. Mesmo as fibras F_{CR} , que apresentaram os menores teores de fenólicos e menor atividade antioxidante, se destacam em relação às fibras $F_{\text{Água}}$, que não apresentam fenólicos, tampouco atividade antioxidante (Tabela 2). Enfatiza-se que a técnica SBS possibilitou, com eficiência, a produção de fibras poliméricas com atividade antioxidante, mesmo sendo empregadas temperaturas de até 90 °C, na preparação da solução polimérica e 45 °C durante a fiação.

3.3.5. Avaliação da fotodegradação da atividade antioxidante durante o armazenamento das fibras poliméricas

Materiais de embalagens, principalmente aquelas direcionados à aplicação em alimentos, como é o caso das nanofibras poliméricas desenvolvidas, devem ter a capacidade de manter as propriedades físicas ou funcionais em um nível razoável para garantir a segurança e proteger o produto embalado ao longo do armazenamento. Logo, a estabilidade à luz da atividade antioxidante das nanofibras controle ($F_{\text{Água}}$) e aquelas contendo os extratos vegetais (F_{CS} , F_{AP} , F_{JP} e F_{CR}) foi estudada ao longo de 31 dias. As análises de regressão linear da capacidade de reduzir o radical DPPH^{*+} logo após a produção (t_0), e após 11 (t_1), 21 (t_2) e 31 (t_3) dias são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Avaliação da fotodegradação da atividade antioxidante (ensaio do radical DPPH^{*+}) durante 31 dias de armazenamento das nanofibras de PVA controle (F_{Água}) e das contendo os extratos vegetais de farelo de Cacau (F_{CS}), polpa de açaí (F_{AP}), cascas de jabuticaba (F_{JP}) e resíduo de cenouras laranjas (F_{CR}).



As porcentagens iniciais das atividades antioxidantes (%AA) das fibras poliméricas com os extratos vegetais variaram entre 84,30 (F_{CR}) e 90,81 (F_{JP}) %. Após 31 dias de armazenamento, os valores variaram entre 71,97 (F_{CR}) e 86,44 (F_{JP}) %AA. Já as fibras F_{Água} não apresentaram atividade antioxidante em nenhum tempo estudado (Figura 4). Além disso, o tempo de armazenamento sob a presença de luz proporcionou às fibras F_{CS}, F_{AP}, F_{JP} e F_{CR} reduções inferiores à 15 %AA, sendo que as fibras F_{CR} aquelas com maior redução (14,60 %AA) e as fibras F_{JP} as mais estáveis após 31 dias (4,80 %AA).

A maior estabilidade da atividade antioxidante ao longo do armazenamento pode ser justificada pelo fato do processo de fiação por SBS poder promover a redução do tamanho dos compostos e constituintes bioativos presentes nos extratos vegetais incorporados, tendo em vista que materiais e compostos na escala nanométrica podem apresentar propriedades físicas, químicas e biológicas diferentes de quando estavam em escala macro ou micrométricas (Li et al., 2004; Yoo et al., 2009). Além disso, os resultados obtidos no presente estudo corroboraram as afirmações de Göksen et al. (2020) e Khoshnoudi-Nia et al. (2020), os quais citam que essa estabilidade também poderia ser explicada por uma possível liberação mais sustentada ao longo do tempo devido à maior relação superfície/volume e estruturas porosas geradas pelo processo de fiação, fazendo com que as nanofibras poliméricas melhorem a foto-estabilidade dos composto bioativos e apresentem um bom potencial para sistemas de entrega.

3.4. Aplicação das nanofibras em morangos

Com o intuito de comprovar a ação e a viabilidade de aplicação das nanofibras em alimentos, selecionou-se a F_{JP}, por ter sido a que mais se destacou, quanto a %IE_F e foto-estabilidade, tendo a nanofibra F_{Água} como controle positivo e a ausência de nanofibra como controle negativo. As nanofibras F_{JP} e F_{Água} foram aplicadas como revestimentos em morango, fruto escolhido como modelo de aplicação.

Na Tabela 3 estão expostos os valores relativos às determinações de perda de massa, parâmetros de cor (ΔE , BI e $^{\circ}Hue$), TPC e atividades antioxidantes (β -Caroteno e DPPH*⁺) nos morangos sem revestimento (S_{Controle}) e dos revestidos com as nanofibras de PVA controle (S_{FÁgua}) e as com o extrato aquoso das cascas de jabuticaba (S_{MPI}). Todas as variáveis analisadas, à exceção de BI, foram influenciadas pelo revestimento, em função do armazenamento.

Tabela 3 – Médias das análises de perda de massa, coloração (ΔE , BI e $^{\circ}Hue$), teor de compostos fenólicos totais (TPC) e atividades antioxidantes (β -Caroteno e DPPH*⁺) nos diferentes tempos de armazenados (0, 3, 6, 9 e 12 dias) dos morangos sem revestimento (S_{Controle}) e dos revestidos com as nanofibras de PVA controle (S_{FÁgua}) e as com o extrato aquoso das cascas de jabuticaba (S_{FJP}).

Determinações	Tempo de armazenamento (Dias)	Tratamento dos morangos		
		S _{Controle}	S _{FÁgua}	S _{FJP}
Perda de massa (%)	t ₀ (0)	Nd	Nd	Nd
	t ₁ (3)	0,38 ^a	0,40 ^a	0,44 ^a
	t ₂ (6)	0,48 ^a	0,53 ^a	0,57 ^a
	t ₃ (9)	1,43 ^a	0,94 ^b	0,57 ^c
	t ₄ (12)	1,67 ^a	0,97 ^b	0,66 ^c
$^{\circ}Hue$	t ₀ (0)	46,72 ^a	44,77 ^a	46,25 ^a
	t ₁ (3)	41,48 ^a	44,58 ^a	44,47 ^a
	t ₂ (6)	39,19 ^b	40,85 ^b	46,08 ^a
	t ₃ (9)	40,92 ^a	41,75 ^a	40,09 ^a
	t ₄ (12)	41,44 ^a	40,73 ^a	42,41 ^a
BI	t ₀ (0)	115,51 ^a	119,08 ^a	125,45 ^a
	t ₁ (3)	162,43 ^a	177,40 ^a	163,73 ^a
	t ₂ (6)	159,27 ^a	171,55 ^a	168,12 ^a
	t ₃ (9)	189,07 ^a	176,46 ^a	150,61 ^a
	t ₄ (12)	169,50 ^a	183,61 ^a	182,84 ^a

	t₀ (0)	Nd	Nd	Nd
	t₁ (3)	11,07 ^a	10,28 ^a	6,55 ^b
ΔE	t₂ (6)	16,63 ^a	9,52 ^b	5,94 ^c
	t₃ (9)	14,57 ^a	11,93 ^b	11,57 ^b
	t₄ (12)	14,17 ^a	11,96 ^a	11,52 ^a
	t₀ (0)	261,05 ^a	260,75 ^a	262,48 ^a
	t₁ (3)	251,00 ^a	254,47 ^a	259,00 ^a
TPC (mg EAG. 100⁻¹ g)	t₂ (6)	241,73 ^a	244,19 ^a	251,23 ^a
	t₃ (9)	218,33 ^b	236,22 ^a	241,04 ^a
	t₄ (12)	194,67 ^b	227,24 ^a	233,45 ^a
	t₀ (0)	75,02 ^a	75,09 ^a	75,95 ^a
	t₁ (3)	70,82 ^a	74,90 ^a	74,85 ^a
β-caroteno (% de proteção)	t₂ (6)	69,53 ^b	73,57 ^a	74,81 ^a
	t₃ (9)	68,39 ^b	72,83 ^a	73,22 ^a
	t₄ (12)	60,66 ^b	70,98 ^a	72,85 ^a
	t₀ (0)	45,17 ^a	44,39 ^a	44,49 ^a
	t₁ (3)	44,23 ^a	44,25 ^a	44,04 ^a
DPPH*⁺ (%AA)	t₂ (6)	39,97 ^a	41,19 ^a	41,97 ^a
	t₃ (9)	36,60 ^a	39,15 ^a	39,51 ^a
	t₄ (12)	20,70 ^b	36,74 ^a	37,01 ^a

**Médias seguidas de letras minúsculas na mesma linha não diferem entre si pelo Teste de Scott-knott a 5% de significância ($p > 0,05$); ΔE = Índice de variação da coloração total; BI = Índice de escurecimento; EAG = Equivalente de Ácido Gálico; AA = Atividade antioxidante; Nd = Não detectado.

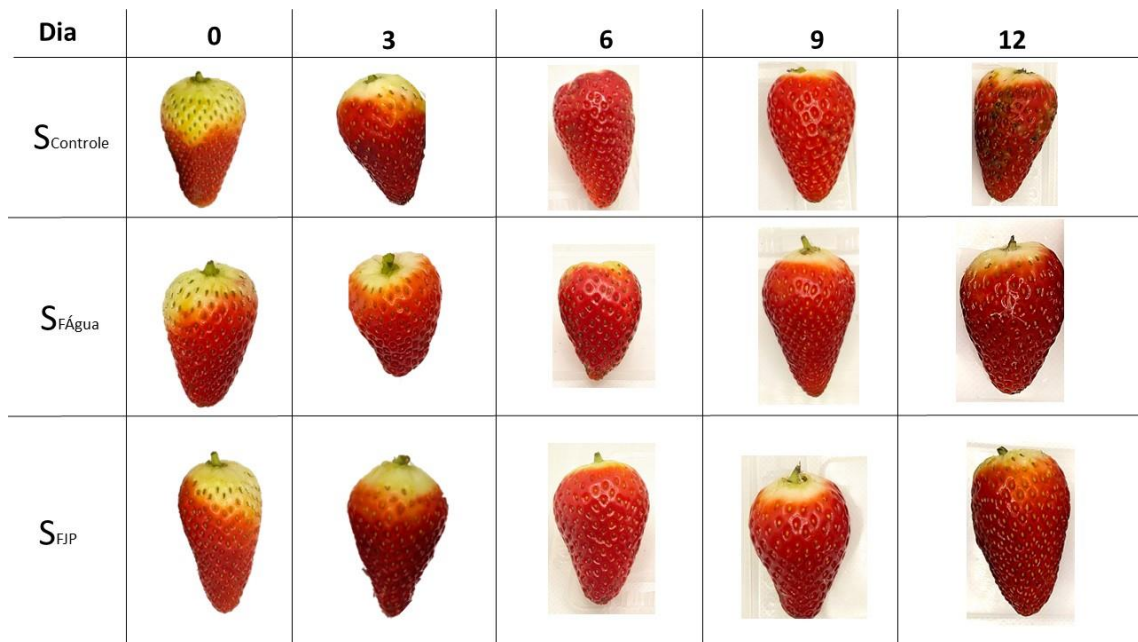
3.4.1. Perda de massa

Diferenças significativas entre as perdas de massa foram observadas a partir dos nove dias de armazenamento, sendo maior nos morangos sem revestimento, quando comparada com a dos demais tratamentos. Por outro lado, a perda de massa dos frutos revestidos com as nanofibras de PVA foi maior que dos frutos revestidos com S_{MPJ} (Tabela 3). Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de o morango ser muito suscetível à perda de água devido à sua casca extremamente fina, resultando em uma baixa barreira natural ao vapor de água. Ao adicionar-se um revestimento como barreira física essa perda é reduzida (do Lago et al., 2023; Luksiene & Buchovec, 2019). Além disso, as diferenças entre as amostras S_{FÁgua} e S_{FJP} podem ser explicadas pelo fato de as nanofibras F_{JP} apresentarem diâmetros um pouco maiores (Tabela 3), logo a cobertura no fruto é maior, sendo uma maior barreira, retardando a perda de massa.

3.4.2. Parâmetros de cor

O índice de escurecimento (BI) dos morangos não alterou, significativamente ($p > 0,05$), em função do revestimento aplicado, ao longo do armazenamento. Uma tendência de aumento de BI foi observada nos frutos, a despeito do revestimento aplicado. Variações significativas ($p \leq 0,05$) no $^{\circ}$ Hue foram notadas apenas aos 9 dias de armazenamento, quando F_{JP} foi efetivo na redução das alterações dessa variável. De modo geral, os valores de $^{\circ}$ Hue encontrados, a despeito do tratamento, flutuaram em torno de 39 e 47 (Tabela 3), o que corrobora a coloração avermelhada dos frutos observada na Figura S4, oriunda dos pigmentos antocianinas (Bal et al., 2011; Carvalho do Lago et al., 2023). Diferenças significativas ($p \leq 0,05$) do ΔE foram notadas dos 3 aos 9 dias de armazenamento. O cálculo do ΔE envolve as variações conjuntas entre as variáveis a^* , b^* e L^* ao longo do tempo em relação ao tempo zero. Ou seja, quanto maior do ΔE , maiores as alterações na coloração do fruto. Notou-se aumento do ΔE dos frutos, ao longo do armazenamento, sendo que o revestimento com F_{JP} determinou as menores alterações, nesse intervalo de tempo, mostrando-se como mais efetivo, seguido pelo $F_{\text{Água}}$ (Tabela 3).

Figura S4 – Representações dos morangos de os tratamentos controle (S_{Controle}) e os com as nanofibras de PVA controle ($S_{F_{\text{Água}}}$) e nanofibras com o extrato aquoso das cascas de jabuticaba ($S_{F_{JP}}$) após serem retirados os revestimentos para as avaliações nos tempos de armazenamento (0, 3, 6, 9 e 12 dias).



O incremento nos valores de BI e ΔE indicam escurecimento e alteração da coloração dos frutos, durante seu armazenamento, que podem ser explicados pela possível ação de fungos (do Lago et al., 2023; Higuera et al., 2019) ou pelo processo de escurecimento enzimático,

catalisado por enzimas do grupo das polifenol oxidases, que em contato com oxigênio promovem a oxidação de compostos fenólicos a o-quinonas, que se polimerizam formando compostos escuros conhecidos como melaninas (do Lago et al., 2023; Taiz & Zeiger, 2013). Tais alterações e surgimento de pigmentos escuros também podem ser observadas visualmente pelas Figuras S2 e S4, sendo mais expressivos nos morangos do tratamento controle (S_{Controle}).

Com base nas observações visuais dos frutos apresentadas nas Figuras S2 e S4 e nos resultados discutidos em relação às variáveis de coloração (Tabela 3) pode-se inferir que as nanofibras F_{JP} , conseguiram retardar, por mais tempo, a degradação dos pigmentos responsáveis pela coloração e a oxidação de compostos fenólicos possíveis responsáveis pelo aparecimento de pigmentos escuros na superfície dos frutos (S_{FJP}). Esse retardo pode ser explicado pelo fato dos compostos bioativos presentes nas nanofibras enriquecidas com o extrato das cascas de jabuticaba terem sido oxidados ou degradados no lugar dos constituintes e pigmentos dos morangos, hipótese que também foi abordada nos estudos de Aytac et al. (2016) e Khoshnoudi-Nia et al. (2020) para outros tipos de alimentos.

3.4.3. Determinações de TPC e da atividade antioxidante (β -Caroteno e DPPH^{*+})

Os frutos revestidos ($S_{\text{FÁgua}}$ e S_{FJP}) apresentaram as menores perdas de TPC e as atividades antioxidantes (β -Caroteno e DPPH^{*+}) durante o armazenamento (Tabela 3). Os revestimentos, mesmo o não ativo, foi efetivo para aumento do tempo de prateleira do morango, uma vez que $S_{\text{FÁgua}}$ e S_{FJP} apresentaram as menores perdas durante o armazenamento (Tabela 3). Os morangos revestidos com os dois tipos de nanofibras ($S_{\text{FÁgua}}$ e S_{FJP}) não diferiram entre si ($p > 0,05$), ao longo do armazenamento, quanto a essas variáveis. Não obstante, o revestimento dos frutos com as nanofibras determinou, a partir do sexto, nono e décimo segundo dias de armazenamento, menores perdas da atividade antioxidante medida pelo método β -Caroteno/ácido linoleico, TPC e atividade antioxidante medida pelo método do DPPH^{*+}, respectivamente (Tabela 3).

A redução da atividade antioxidante de frutos está associada, normalmente, à degradação de compostos bioativos, como os fenólicos. Com efeito, no presente trabalho, a redução na concentração de fenólicos totais foi acompanhada pela redução da atividade antioxidante, ao longo do armazenamento. Essas reduções podem ser relacionadas a reações redox e produção de radicais livres que ocorrem naturalmente durante o amadurecimento e senescência dos frutos, principalmente quando há injúrias mecânicas e contato direto com luz e oxigênio (do Lago et al., 2023; Taiz & Zeiger, 2013). Aytac et al. (2016), Khoshnoudi-Nia et

al. (2020) e Zeinali et al. (2021) afirmam que nanofibras poliméricas podem ser usadas como materiais de embalagem de alimentos e que o revestimento de frutos desempenha efeitos de barreira à microrganismos, luz, oxigênio e como limitador da taxa respiratória, culminando na redução do metabolismo, assim como dos eventos de senescência e do crescimento microbiológico. Corroborando as afirmações dos autores recém citados, o revestimento dos morangos com F_{Água} e F_{JP} mostrou-se efetivo na conservação de fenólicos e atividade antioxidante de morangos, durante o armazenamento.

3.4.4. Determinação visual de frutos impróprios para consumo

O percentual de frutos impróprios para consumo foi determinado com base na identificação visual daqueles frutos cuja aparência foi alterada com a presença de áreas acastanhadas, áreas amolecidas e crescimento visível de micélio fúngico. A evolução das alterações nas superfícies dos frutos, ao longo dos 12 dias de armazenamento, pode ser visualizada nas Figuras S2 e S4. No presente estudo, a primeira ocorrência de alterações na aparência foi observada nos morangos sem revestimento, no sexto dia de armazenamento, com 8 % de frutos impróprios. Posteriormente, no nono dia de avaliação, observou-se 25, 17 e 8 % de frutos impróprios, considerando-se o controle sem revestimento, S_{FÁgua} e S_{FJP}, respectivamente. Por fim, aos 12 dias de armazenamento, essas porcentagens aumentaram, chegando a 58 % nos morangos não revestidos e a 25 % nos morangos revestidos com F_{Água} e F_{JP}.

Uma classificação de morangos em relação à porcentagem de frutos impróprios para consumo foi estabelecida por Lu et al. (2018), a saber: morangos com nenhum dano (0 %); dano leve (≤ 25 %); dano moderado (> 25 % e ≤ 50 %); dano severo (> 50 % e ≤ 75 %) e completamente danificado (> 75 %). Dessa forma, nota-se que os frutos revestidos com as nanofibras (S_{FÁgua} e S_{FJP}) apresentaram dados leves, a partir do nono dia, enquanto os morangos não revestidos apresentaram de danos leves a severos, dos seis aos 12 dias de armazenamento. Pelo exposto, observa-se que, independentemente do tratamento, houve a ocorrência e o aumento das alterações visíveis na superfície dos frutos durante o armazenamento. No entanto, o aparecimento e o crescimento das porcentagens de frutos impróprios foram mais tardios e menos pronunciados nos morangos revestidos, especialmente com F_{JP}. O estudo desenvolvido por Zeinali et al. (2021) confirmam essas observações, tendo em vista que ao aplicarem em um sistema de embalagem ativa, concluíram que as nanofibras eletrofiadas de PVA liberaram

compostos bioativos do extrato de jujuba (*Ziziphus jujube* Mill.), preservando a qualidade nutricional e sensorial dos morangos durante o tempo de armazenamento.

Do Lago et al. (2023) correlacionaram o aumento do percentual de morangos impróprios com à senescência, perda de massa, aumento da taxa respiratória, síntese de antocianina, BI, perda de firmeza, aumento da pectina solúvel e da atividade de enzimas amaciantes, menor atividade antioxidante e menor teor de ácido ascórbico. Partindo desse pressuposto, as observações feitas referentes à porcentagem de frutos impróprios podem ser correlacionadas e corroboram os resultados já discutidos (Tabela 3). Portanto, foi possível constatar que as aplicações das nanofibras como revestimentos comestíveis ($S_{FÁgua}$ e S_{FJP}), com ênfase para F_{JP} , exerceram efeitos positivos nos morangos, seja direta ou indiretamente, contribuindo para manutenção dos compostos bioativos, atividade antioxidante e, conseqüentemente, da qualidade sensorial e potencial funcional dos frutos.

4. CONCLUSÕES

Os extratos aquosos de farelo de cacau, polpa do açaí, cascas das jabuticabas e resíduos de cenouras se destacam pelos elevados teores de fenólicos totais e atividade antioxidante, o que justifica sua incorporação em nanofibras poliméricas.

A incorporação dos extratos aquosos vegetais estudados, em substituição à água, promove o aumento da viscosidade das soluções poliméricas de PVA.

A fiação de PVA em água e extratos aquosos vegetais estudados pela técnica SBS permite a obtenção com sucesso de nanofibras poliméricas, sendo os extratos vegetais efetivamente incorporados.

As nanofibras poliméricas de PVA agregadas de farelo de cacau, polpa do açaí, cascas das jabuticabas e resíduos de cenouras apresentam maiores semelhanças entre si e grandes diferenças, quanto aos teores de compostos fenólicos e da atividade antioxidante e sua foto-estabilidade durante o armazenamento, quando comparadas com as nanofibras de PVA não agregadas de extratos vegetais, com destaque para as nanofibras de cascas de jabuticaba.

O revestimento de morangos com nanofibras, com destaque para a F_{JP} , foi efetivo em retardar a perda de massa, as alterações na coloração e as reduções de TPC e atividade antioxidante e porcentagens de frutos impróprios.

O presente estudo comprova a possibilidade de se desenvolver nanofibras poliméricas de PVA, sem ou com extratos de diferentes fontes vegetais, e a viabilidade de aplicá-las como

materiais de revestimentos comestíveis destinados a frutos, como morangos, com a finalidade de aumentar sua vida útil pós-colheita.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Análises e Prospecção Química (CAPQ) e aos Laboratórios de Energias Renováveis e Materiais Avançados (LABERMA) e de Microscopia Eletrônica e Análise Ultra estrutural (LME) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), e pelo apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Bolsas de Produtividade em Pesquisa 302259/2018-0, 302699/2019-8, 404716/2021-0, 405802/2022-6, 305880/2021-7, CNPq, Brasil), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (88881.068456/2014-01, 88881.200497/2018-01, CAPES, Brasil), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (PPM-00355-17, APQ-01505-15, BPD-00406-22, APQ-00516-22, APQ-00413-22, FAPEMIG, Brasil), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP, Brasil), a Universidade Federal de Lavras (UFLA, Lavras, Minas Gerais, Brasil).

REFERÊNCIAS

- Alasalvar, C., Grigor, J. M., Zhang, D., Quantick, P. C., & Shahidi, F. (2001). Comparison of Volatiles, Phenolics, Sugars, Antioxidant Vitamins, and Sensory Quality of Different Colored Carrot Varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1410–1416. <https://doi.org/10.1021/jf000595h>
- Álvarez-Hernández, M. H., Martínez-Hernández, G. B., Castillejo, N., Martínez, J. A., & Artés-Hernández, F. (2021). Development of an antifungal active packaging containing thymol and an ethylene scavenger. Validation during storage of cherry tomatoes. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100734. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100734>
- Andzi Barhé, T., & Feuya Tchouya, G. R. (2016). Comparative study of the anti-oxidant activity of the total polyphenols extracted from Hibiscus Sabdariffa L., Glycine max L. Merr., yellow tea and red wine through reaction with DPPH free radicals. *Arabian Journal of Chemistry*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.048>
- Aytac, Z., Kusku, S. I., Durgun, E., & Uyar, T. (2016). Encapsulation of gallic acid/cyclodextrin inclusion complex in electrospun polylactic acid nanofibers: Release behavior and antioxidant activity of gallic acid. *Materials Science and Engineering: C*, 63, 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.02.063>

- Baker, M. I., Walsh, S. P., Schwartz, Z., & Boyan, B. D. (2012). A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, *100B*(5), 1451–1457. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.32694>
- Bal, L. M., Kar, A., Satya, S., & Naik, S. N. (2011). Kinetics of colour change of bamboo shoot slices during microwave drying. *International Journal of Food Science and Technology*, *46*(4), 827–833. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02553.x>
- Baltacıoğlu, H., Baltacıoğlu, C., Okur, I., Tanrıvermiş, A., & Yalıt, M. (2021). Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from tomato: Characterization by FTIR and HPLC and comparison with conventional solvent extraction. *Vibrational Spectroscopy*, *113*, 103204. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103204>
- Barhoum, A., Pal, K., Rahier, H., Uludag, H., Kim, I. S., & Bechelany, M. (2019). Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. *Applied Materials Today*, *17*, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, *28*(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Burdon, J., McLeod, D., Lallu, N., Gamble, J., Petley, M., & Gunson, A. (2004). Consumer evaluation of “Hayward” kiwifruit of different at-harvest dry matter contents. *Postharvest Biology and Technology*, *34*(3), 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.04.009>
- Choi, C. W., Kim, S. C., Hwang, S. S., Choi, B. K., Ahn, H. J., Lee, M. Y., Park, S. H., & Kim, S. K. (2002). Antioxidant activity and free radical scavenging capacity between Korean medicinal plants and flavonoids by assay-guided comparison. *Plant Science*, *163*(6), 1161–1168. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00332-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00332-1)
- de Barros, H. E. A., Natarelli, C. V. L., de Carvalho Tavares, I. M., de Oliveira, A. L. M., Araújo, A. B. S., Pereira, J., Carvalho, E. E. N., de Barros Vilas Boas, E. V., & Franco, M. (2020). Nutritional Clustering of Cookies Developed with Cocoa Shell, Soy, and Green Banana Flours Using Exploratory Methods. *Food and Bioprocess Technology*, *13*(9), 1566–1578. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02495-w>
- de Menezes, B. B., Frescura, L. M., Duarte, R., Villetti, M. A., & da Rosa, M. B. (2021). A critical examination of the DPPH method: Mistakes and inconsistencies in stoichiometry

- and IC50 determination by UV–Vis spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, *1157*, 338398. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338398>
- de Oliveira, A. L. M., Bento, J. A. C., Fidelis, M. C., Dias, M. C., de Barros, H. E. A., Natarelli, C. V. L., do Lago, R. C., Barbosa, J. W., Ossani, P. C., Caliari, M., Júnior, M. S. S., Tonoli, G. H. D., Carvalho, E. E. N., Franco, M., Cirillo, M. Â., & de Barros Vilas Boas, E. V. (2023). Effect of pine, eucalyptus, and corn straw nanofibers on the structural properties of rice flour-based biodegradable films. *Industrial Crops and Products*, *191*, 115929. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115929>
- do Lago, R. C., Zitha, E. Z. M., de Oliveira, A. L. M., de Abreu, D. J. M., Carvalho, E. E. N., Piccoli, R. H., Tonoli, G. H. D., & Boas, E. V. de B. V. (2023). Effect of coating with co-product-based bionanocomposites on the quality of strawberries under refrigerated storage. *Scientia Horticulturae*, *309*, 111668. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.111668>
- Escribano, S., Biasi, W. V., Lerud, R., Slaughter, D. C., & Mitcham, E. J. (2017). Non-destructive prediction of soluble solids and dry matter content using NIR spectroscopy and its relationship with sensory quality in sweet cherries. *Postharvest Biology and Technology*, *128*, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.016>
- Gaviria, Y. A. R., Palencia, N. S. N., Capello, C., Trevisol, T. C., Monteiro, A. R., & Valencia, G. A. (2021). Nanostructured pH-Indicator Films Based on Cassava Starch, Laponite, and Jambolan (*Syzygium cumini*) Fruit Manufactured by Thermo-Compression. *Starch - Stärke*, *73*(5–6), 2000208. <https://doi.org/10.1002/star.202000208>
- Göksen, G., Fabra, M. J., Ekiz, H. I., & López-Rubio, A. (2020). Phytochemical-loaded electrospun nanofibers as novel active edible films: Characterization and antibacterial efficiency in cheese slices. *Food Control*, *112*, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107133>
- Herman, R. A., Ayepa, E., Fometu, S. S., Shittu, S., Davids, J. S., & Wang, J. (2022). Mulberry fruit post-harvest management: Techniques, composition and influence on quality traits - A review. *Food Control*, *140*, 109126. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109126>
- Higuera, J. J., Garrido-Gala, J., Lekhou, A., Arjona-Girona, I., Amil-Ruiz, F., Mercado, J. A., Pliego-Alfaro, F., Muñoz-Blanco, J., López-Herrera, C. J., & Caballero, J. L. (2019). The Strawberry FaWRKY1 Transcription Factor Negatively Regulates Resistance to *Colletotrichum acutatum* in Fruit Upon Infection. *Frontiers in Plant Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00480>

- Huang, Y., Song, J., Yang, C., Long, Y., & Wu, H. (2019). Scalable manufacturing and applications of nanofibers. *Materials Today*, 28, 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.04.018>
- Khoshnoudi-Nia, S., Sharif, N., & Jafari, S. M. (2020). Loading of phenolic compounds into electrospun nanofibers and electrospayed nanoparticles. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.013>
- Kumar, A., Negi, Y. S., Choudhary, V., & Bhardwaj, N. K. (2014). Microstructural and mechanical properties of porous biocomposite scaffolds based on polyvinyl alcohol, nano-hydroxyapatite and cellulose nanocrystals. *Cellulose*, 21(5), 3409–3426. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0339-7>
- Li, D., McCann, J. T., & Xia, Y. (2004). Use of Electrospinning to Directly Fabricate Hollow Nanofibers with Functionalized Inner and Outer Surfaces. *Small*, 1(1), 83–86. <https://doi.org/10.1002/sml.200400056>
- Lu, H., Wang, K., Wang, L., Li, D., Yan, J., Ban, Z., Luo, Z., Li, L., & Yang, D. (2018). Effect of superatmospheric oxygen exposure on strawberry (*Fragaria × ananassa* Fuch.) volatiles, sensory and chemical attributes. *Postharvest Biology and Technology*, 142, 60–71. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2018.04.007>
- Luksiene, Z., & Buchovec, I. (2019). Impact of chlorophyllin-chitosan coating and visible light on the microbial contamination, shelf life, nutritional and visual quality of strawberries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 463–472. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.02.003>
- Malvano, F., Montone, A. M. I., Capuano, F., Colletti, C., Roveri, N., Albanese, D., & Capparelli, R. (2022). Effects of active alginate edible coating enriched with hydroxyapatite-quercetin complexes during the cold storage of fresh chicken fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100847. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100847>
- Mansur, H. S., Sadahira, C. M., Souza, A. N., & Mansur, A. A. P. (2008). FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. *Materials Science and Engineering: C*, 28(4), 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.088>
- Mariño-Cortegoso, S., Stanzione, M., Andrade, M. A., Restuccia, C., Rodríguez-Bernaldo de Quirós, A., Buonocore, G. G., Barbosa, C. H., Vilarinho, F., Silva, A. S., Ramos, F., Khwaldia, K., Sendón, R., & Barbosa-Pereira, L. (2022). Development of active films utilizing antioxidant compounds obtained from tomato and lemon by-products for use in

- food packaging. *Food Control*, *140*, 109128. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109128>
- Md Nor, S., & Ding, P. (2020). Trends and advances in edible biopolymer coating for tropical fruit: A review. *Food Research International*, *134*, 109208. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109208>
- Medeiros, E. S., Glenn, G. M., Klamczynski, A. P., Orts, W. J., & Mattoso, L. H. C. (2009). Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, *113*(4), 2322–2330. <https://doi.org/10.1002/app.30275>
- Medina, M. B. (2011). Determination of the total phenolics in juices and superfruits by a novel chemical method. *Journal of Functional Foods*, *3*(2), 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.02.007>
- Melo, P. S., Arrivetti, L. de O. R., Alencar, S. M. de, & Skibsted, L. H. (2016). Antioxidative and prooxidative effects in food lipids and synergism with α -tocopherol of açai seed extracts and grape rachis extracts. *Food Chemistry*, *213*, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.101>
- Muley, A. B., & Singhal, R. S. (2020). Extension of postharvest shelf life of strawberries (*Fragaria ananassa*) using a coating of chitosan-whey protein isolate conjugate. *Food Chemistry*, *329*, 127213. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127213>
- Nwafor, E.-O., Lu, P., Zhang, Y., Liu, R., Peng, H., Xing, B., Liu, Y., Li, Z., Zhang, K., Zhang, Y., & Liu, Z. (2022). Chlorogenic acid: Potential source of natural drugs for the therapeutics of fibrosis and cancer. *Translational Oncology*, *15*(1), 101294. <https://doi.org/10.1016/j.tranon.2021.101294>
- Oliveira, J. E., Moraes, E. A., Costa, R. G. F., Afonso, A. S., Mattoso, L. H. C., Orts, W. J., & Medeiros, E. S. (2011). Nano and submicrometric fibers of poly(D,L-lactide) obtained by solution blow spinning: Process and solution variables. *Journal of Applied Polymer Science*, *122*(5), 3396–3405. <https://doi.org/10.1002/app.34410>
- Oliveira, J. E., Zucolotto, V., Mattoso, L. H. C., & Medeiros, E. S. (2012). Multi-Walled Carbon Nanotubes and Poly(lactic acid) Nanocomposite Fibrous Membranes Prepared by Solution Blow Spinning. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *12*(3), 2733–2741. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.5730>
- Prior, R., & Cao, G. (2000). In vivo total antioxidant capacity: Comparison of different analytical methods. In *Free radical biology & medicine* (Vol. 27). [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(99\)00203-8](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(99)00203-8)

- Quatrin, A., Pauletto, R., Maurer, L. H., Minuzzi, N., Nichelle, S. M., Carvalho, J. F. C., Maróstica, M. R., Rodrigues, E., Bochi, V. C., & Emanuelli, T. (2019). Characterization and quantification of tannins, flavonols, anthocyanins and matrix-bound polyphenols from jaboticaba fruit peel: A comparison between *Myrciaria trunciflora* and *M. jaboticaba*. *Journal of Food Composition and Analysis*, *78*, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.01.018>
- Rebollo-Hernanz, M., Cañas, S., Taladrid, D., Segovia, Á., Bartolomé, B., Aguilera, Y., & Martín-Cabrejas, M. A. (2021). Extraction of phenolic compounds from cocoa shell: Modeling using response surface methodology and artificial neural networks. *Separation and Purification Technology*, *270*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118779>
- Riaz, A., Lei, S., Akhtar, H. M. S., Wan, P., Chen, D., Jabbar, S., Abid, M., Hashim, M. M., & Zeng, X. (2018). Preparation and characterization of chitosan-based antimicrobial active food packaging film incorporated with apple peel polyphenols. *International Journal of Biological Macromolecules*, *114*, 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.126>
- Riva, S. C., Opara, U. O., & Fawole, O. A. (2020). Recent developments on postharvest application of edible coatings on stone fruit: A review. *Scientia Horticulturae*, *262*, 109074. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.109074>
- Rodríguez-Félix, F., Corte-Tarazón, J. A., Rochín-Wong, S., Fernández-Quiroz, J. D., Garzón-García, A. M., Santos-Sauceda, I., Plascencia-Martínez, D. F., Chan-Chan, L. H., Vásquez-López, C., Barreras-Urbina, C. G., Olguin-Moreno, A., & Tapia-Hernández, J. A. (2022). Physicochemical, structural, mechanical and antioxidant properties of zein films incorporated with no-ultrafiltered and ultrafiltered betalains extract from the beetroot (*Beta vulgaris*) bagasse with potential application as active food packaging. *Journal of Food Engineering*, *334*, 111153. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111153>
- Rufino, M. do S. M., Alves, R. E., de Brito, E. S., Pérez-Jiménez, J., Saura-Calixto, F., & Mancini-Filho, J. (2010). Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. *Food Chemistry*, *121*(4), 996–1002. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.037>
- Salcedo, C. L., López de Mishima, B. A., & Nazareno, M. A. (2010). Walnuts and almonds as model systems of foods constituted by oxidisable, pro-oxidant and antioxidant factors. *Food Research International*, *43*(4), 1187–1197. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.02.016>

- Santos, A. M. C., Medeiros, E. L. G., Blaker, J. J., & Medeiros, E. S. (2016). Aqueous solution blow spinning of poly(vinyl alcohol) micro- and nanofibers. *Materials Letters*, *176*, 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.101>
- Schaich, K. M., Tian, X., & Xie, J. (2015). Hurdles and pitfalls in measuring antioxidant efficacy: A critical evaluation of ABTS, DPPH, and ORAC assays. *Journal of Functional Foods*, *14*, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.043>
- Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, *383*, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>
- Shi, C., Fang, D., Huang, C., Lyu, L., Wu, W., & Li, W. (2023). Electrospun biopolymer material for antimicrobial function of fresh fruit and vegetables: Application perspective and challenges. *LWT*, *174*, 114374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114374>
- Sun, J., Jiang, H., Wu, H., Tong, C., Pang, J., & Wu, C. (2020). Multifunctional bionanocomposite films based on konjac glucomannan/chitosan with nano-ZnO and mulberry anthocyanin extract for active food packaging. *Food Hydrocolloids*, *107*, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105942>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2013). *Fisiologia Vegetal*. (5th ed.). Artemed.
- U.S. Food and Drug Administration. (2004). *GRAS Notice No. GRN 141*.
- U.S. Food and Drug Administration. (2018). *GRAS Notice No. GRN 767*.
- Vatanpour, V., Teber, O. O., Mehrabi, M., & Koyuncu, I. (2023). Polyvinyl alcohol-based separation membranes: a comprehensive review on fabrication techniques, applications and future prospective. *Materials Today Chemistry*, *28*, 101381. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2023.101381>
- Yoo, H. S., Kim, T. G., & Park, T. G. (2009). Surface-functionalized electrospun nanofibers for tissue engineering and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *61*(12), 1033–1042. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.07.007>
- Zeinali, T., Alemzadeh, E., Zarban, A., Khorashadizadeh, M., & Ansarifard, E. (2021). Fabrication and characterization of jujube extract-loaded electrospun polyvinyl alcohol nanofiber for strawberry preservation. *Food Science & Nutrition*, *9*(11), 6353–6361. <https://doi.org/10.1002/FSN3.2601>

ARTIGO 2: Um novo nano-sachê produzido por fiação por sopro em solução para retardar amadurecimento de bananas usando mantas poliméricas nanoestruturadas biodegradáveis emissoras de 1-metilciclopropeno

*Artigo elaborado segundo as normas da revista *Innovative Food Science and Emerging Technologies* – ISSN: 1466-8564

Hanna Elisia Araújo de Barros, Caio Vinicius Lima Natarelli, Ingrid Alves Santos, Lenilton Santos Soares, Elano Pinheiro Pereira, João Paulo Lima de Oliveira, Gilson Gustavo Lucinda Machado, Elisângela Elena Nunes Carvalho, Juliano Elvis de Oliveira, Marcelo Franco, Eduardo Valério de Barros Vilas Boas.

RESUMO

Objetivou-se produzir mantas nanoestruturadas de poli (ácido lático) (PLA) incorporadas com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado (F1-MCP), pela técnica fiação por sopro em solução (SBS) e aplicá-las como nano-sachê emissor de 1-MCP em um sistema de embalagem de bananas. As nanofibras que compõem as mantas apresentaram morfologia uniforme com diâmetros entre 157 e 184 nm. A microscopia eletrônica de varredura permitiu evidenciar que cristais de 1-MCP/ α -CD foram encapsulados, assim como encontraram-se na superfície das nanofibras, alterando suas propriedades térmicas e seus ângulos de contato. A liberação do gás 1-MCP, a partir dos nano-sachê de mantas nanoestruturadas de PLA com 1-MCP/ α -CD encapsulados, foi comprovada, com base no retardo do amadurecimento da banana, durante o armazenamento (21 °C e 90 %UR). Portanto, as mantas nanoestruturadas de PLA com MCP/ α -CD encasulado, produzidas pelo SBS, se mostraram viáveis e aplicáveis em sistemas de embalagens que visam retardar o amadurecimento e aumentar vida útil pós-colheita de frutos climatéricos, como as bananas.

Palavras-chaves: Nanomateriais; SBS; Pós-colheita; Frutos climatéricos; *Shelf life*.

1. INTRODUÇÃO

Frutos climatéricos devem ser colhidos verde-maturos e assim conservados, utilizando-se técnicas adequadas de armazenamento, até sua distribuição para o varejo. Entretanto, a não adoção ou falhas na adoção dessas técnicas e o estresse ao qual são frequentemente submetidos, durante manuseio, transporte e armazenamento podem precipitar seu amadurecimento, levando a perdas pós-colheita (Chen et al., 2023; Li et al., 2023). A banana (*Musa spp.*) é um dos frutos mais consumido no mundo e por apresentar uma natureza climatérica, após a colheita seu amadurecimento irreversível é naturalmente desencadeado pelo etileno endógeno ou pela presença, intencional ou não, de etileno exógeno. A partir do momento que o amadurecimento é disparado pelo etileno, a vida útil do fruto é grandemente reduzida, em função da rápida deterioração dos atributos de qualidade necessários e desejáveis para o consumo (Al-Dairi et al., 2023; Chen et al., 2023; Li et al., 2023; Xu et al., 2007).

O retardo do início do amadurecimento de frutos pode ser alcançado, de forma eficaz, pela inibição da síntese e ação do etileno, o que normalmente é feito por meio da refrigeração e manipulação de O₂ e CO₂ no ambiente de armazenamento. Não obstante, o 1-metilciclopropeno (1-MCP) é atualmente apresentado como uma alternativa extremamente eficaz no prolongamento da vida útil de frutas e hortaliças, sendo recomendado como tratamento pós-colheita de frutos climatéricos, como as bananas (Chang & Brecht, 2023; Chen et al., 2022; Li et al., 2023). O 1-MCP é um gás hidrofóbico derivado do ciclopropeno que bloqueia a transdução do sinal do etileno, assim como inibe sua biossíntese, ao se ligar fortemente aos receptores do etileno, reduzindo o número de receptores livres para ligação (Chang & Brecht, 2023; Li et al., 2023; Ni et al., 2021).

Para facilitar sua manipulação e comercialização como um produto em pó solúvel em água, o 1-MCP passa pelo processo de complexação de inclusão com a α -ciclodextrina (1-MCP/ α -CD), um oligopolissacarídeo cíclico, com exterior hidrofílico, mas uma cavidade interna hidrofóbica com tamanho adequado para acomodar a molécula do 1-MCP (Blankenship & Dole, 2003; Teixeira et al., 2006). A forma tradicional de aplicação do 1-MCP tem sido pela dissociação do gás em meio aquoso, embora a utilização de sachês emissores de 1-MCP em sistemas de embalagens ativas vêm sendo consideradas promissoras em termos de economia, tempo e qualidade do alimento, por permitirem uma aplicação dinâmica durante o armazenamento e transporte de frutos (Dias et al., 2021; Neoh et al., 2017; Ni et al., 2021).

Dentre os materiais passíveis de serem incorporados com o complexo 1-MCP/ α -CD, encontram-se as mantas nanoestruturadas, um arranjo de nanofibras poliméricas, embora haja

apenas um estudo que tenha desenvolvido nanofibras emissoras de 1-MCP (Neoh et al., 2017). No entanto, a aplicação de nanofibras poliméricas com ação antimicrobiana e antioxidantes já são consideradas alternativas ideais para a preservação de frutas e hortaliças, por apresentarem área superficial aumentada, alta porosidade e capacidade de serem enriquecidas com diversos compostos, além de controlarem a liberação desses compostos ativos ao longo do tempo (Brandão et al., 2023; Miranda et al., 2021; Shi et al., 2023). A eletrofiação é a técnica mais utilizada para a obtenção de nanofibras, embora a fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS), uma técnica emergente, venha ganhando destaque, por não necessitar do uso de campo elétrico, apresentar baixo custo e alta produtividade (Barhoum et al., 2019; Medeiros et al., 2009).

Dentre os polímeros que podem ser usados para a produção das mantas nanoestruturadas encontra-se o poli (ácido láctico) (PLA), um polímero sintético, de fonte natural, hidrofóbico, atóxico, considerado como seguro (GRAS) para entrar em contato direto com alimentos, que vem sendo amplamente aplicado na indústria de embalagens sob o conceito de “plástico verde” (Carrasco et al., 2010; de Albuquerque et al., 2021; Tawakkal et al., 2014). Apesar da obtenção de mantas nanoestruturadas de PLA por SBS e sua aplicação na conservação de frutas serem relatadas como eficiente (Brandão et al., 2023; Miranda et al., 2021), existe uma lacuna na literatura, inexplorada, quanto ao seu uso para encapsular o complexo 1-MCP/ α -CD, mas também em relação à sua aplicação como um material carreador deste complexo em sistemas de embalagens. Logo, a investigação desse tema pode contribuir para a evolução da técnica SBS, assim como das técnicas de conservação da qualidade pós-colheita de frutos, colaborando com a segurança alimentar e dos alimentos.

Pelo exposto, o presente estudo objetivou desenvolver, por meio da técnica SBS, e caracterizar mantas nanoestruturadas de PLA sem e com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado, além de aplicá-las como nano-sachê emissor de 1-MCP em um sistema de embalagem de bananas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Obtenção da matéria-prima

Poli (ácido láctico) (PLA, M_w 66000 g mol⁻¹) foi fornecido pela empresa NatureWorks, Cargill Dow LLC, (Minneapolis, USA). O 1-metilciclopropeno (1-MCP) utilizado foi o produto SmartFreshTM, um complexo de inclusão entre α -ciclodextrina e 3,3% de 1-MCP (1-MCP/ α -CD), cedido pela AgroFresh Brasil LTDA. (Vacaria, Brasil). Bananas (*Musa* spp., cv. ‘Prata’),

no estágio de maturação 2 (verde-matura) (Von Loesecke, 1950), foram adquiridas em comércio local do município de Lavras – Minas Gerais. Embalagens rígidas retangulares de polietileno tereftalato (PET) (235x169x50mm), assim como o filme flexível de policloreto de vinila (PVC) de 0,048 mm de espessura, foram adquiridas de fornecedores padrões.

2.2. Delineamento experimental 1

Este experimento foi conduzido utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) simples, constituído por dois tratamentos de mantas poliméricas nanoestruturadas (MPN) de PLA, sendo um controle (F_{Controle}) e um com complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado ($F_{1\text{-MCP}}$), com 3 repetições.

2.3. Produção das mantas poliméricas nanoestruturadas (MPN)

2.3.1. Preparação da solução polimérica

A solução polimérica na concentração de 12 % (m/v) foi obtida a partir da diluição do PLA em clorofórmio (Êxodo científica, Sumaré, SP, Brasil), por meio da agitação magnética (40 min) em temperatura ambiente (25 °C). Após completa dissolução do PLA, foi adicionado o SmartFresh™, produto carreador do 1-MCP, na concentração de 5 % (m/m) em relação ao peso total do polímero. Posteriormente, essa solução voltou para a agitação até total dispersão do produto no meio. Uma solução sem a adição do 1-MCP (controle) também foi produzida.

2.3.2. Fiação por sopro em solução (*solution blow spinning* - SBS)

Para a procedimento de fabricação das MPN, as soluções poliméricas completamente solubilizadas foram transferidas, individualmente, para uma seringa de vidro de 20 mL e conectadas ao sistema de fiação por sopro em solução (SBS), conforme descrito por Medeiros et al. (2009), com algumas modificações. Dessa forma, o sistema de SBS consistiu em um bocal concêntrico constituído por uma peça interna, alimentada pela solução polimérica e outra externa, alimentada por ar pressurizado gerado por um compressor (CHIAPERINI MC 12 BPV 150L). No processo de fiação, a distância de protusão do bocal interno em relação ao externo utilizada foi de 2 mm. O controle da taxa de alimentação da solução polimérica foi realizado por uma bomba de seringa (NE - 300; New Era Pump Systems), sendo que a taxa de injeção da solução polimérica aplicada foi de 5 mL h⁻¹ e a pressão do ar foi 35 Psi. A umidade do ambiente

foi mantida em 31 ± 1 % e a temperatura do ambiente foi 32 ± 1 °C. Além disso, um coletor cilíndrico, sob rotação, foi colocado a uma distância de trabalho (WD) de 30 cm em relação ao bocal concêntrico.

Por fim, as MPN com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado (F_{1-MCP}) e a controle ($F_{Controle}$) foram moldadas em forma de discos com 2 cm de diâmetro e espessura média de $2,21 \pm 0,42$ mm. Uma parte desses discos foi armazenada em potes herméticos, sob refrigeração à 8 °C e ao abrigo de luz até ser utilizada nas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e ângulo de contato. A outra parte foi imediatamente aplicada como nano-sachês.

2.4. Caracterização das MPN

2.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O processo de fiação das MPN foi conduzido por 10 min, visando-se a obtenção de mantas finas que permitissem a visualização e medição do diâmetro das fibras, isoladamente. As mantas foram fixadas em fita dupla face de carbono que, por sua vez, foi fixada em stubs de alumínio, os quais foram recobertos com ouro em aparelho sputtering (Balzers SCD 050) e as observações realizadas em microscópio eletrônico de varredura FEG de ultra alta resolução (UHR) (Tescan-Clara, Czech Republic), nas condições de 5 KeV, 90 pA com distância de trabalho de 10 mm. Os diâmetros das fibras foram avaliados por meio do software Image J (National Institutes of Health, USA), sendo que para cada amostra o diâmetro médio e sua distribuição foram determinados a partir da análise de pelo menos 100 fibras escolhidas aleatoriamente.

2.4.2. Propriedades Térmicas: Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A propriedade térmica foi analisada por meio da calorimetria diferencial de varredura (Jade-DSC, Perkin Elmer, USA). As amostras, de aproximadamente 3 mg, foram acondicionadas em recipientes de alumínio hermeticamente fechados e aquecidas, adotando-se uma rampa de temperatura de 25 a 210 °C e taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} , sob uma atmosfera de nitrogênio (50 mL min^{-1}). Um recipiente de alumínio vazio foi usado como referência. As curvas de DSC foram tratadas usando o Pyris Data Analysis software®. O grau de cristalinidade (X_c) foi calculado de acordo com a Eq. (1).

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \right) \times 100\% \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo,

ΔH_m = Calor de fusão da amostra;

ΔH_{cc} = Entalpia de cristalização a frio;

ΔH_m^0 = Calor de fusão para o PLA 100 % cristalino (93 J g^{-1}) (Frone et al., 2013).

2.4.3. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para examinar a presença de grupos funcionais das MPN. Para isso, utilizou-se um espectrômetro FT-IR Varian 600-IR com transformada de Fourier (FTIR), com acessório GladiATR da Pike Technologies acoplado para medidas por reflectância total atenuada (ATR) a 45° com cristal de seleneto de zinco. Utilizou-se a faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1} , a partir de 32 varreduras à 4 cm^{-1} .

2.4.4. Ângulo de contato

O ângulo de contato da água foi medido em triplicata em três regiões distintas das amostras (discos de MPN) utilizando um goniômetro (Kruss, DSA25, Hamburgo, Alemanha), com aquisição de imagem e medição dos valores realizada pelo software Advanced (Kruss, Hamburgo, Alemanha). Com isso, os valores dos ângulos formados em ambos os lados da gota foram referentes a 1 s (θ_{t_1}) do contato da gotícula de água com a superfície do material.

2.5. Aplicação das MPN como nano-sachê de embalagens destinadas ao armazenamento de bananas

2.5.1. Delineamento experimental 2

O delineamento aplicado nesta etapa foi o inteiramente casualizado (DIC) fatorial 3×4 , constituído por três embalagens [sem nano-sachê (P_{Controle}), com nano-sachê de MPN controle ($P_{\text{FControle}}$) e com nano-sachê de MPN com 1-MCP encapsulado ($P_{\text{F1-MCP}}$)] e 4 tempos de armazenamentos, a saber, 0, 3, 6 e 9 dias (t_0 , t_1 , t_2 e t_3). O experimento foi conduzido com três repetições e parcela experimental constituída por um buquê formado por duas bananas.

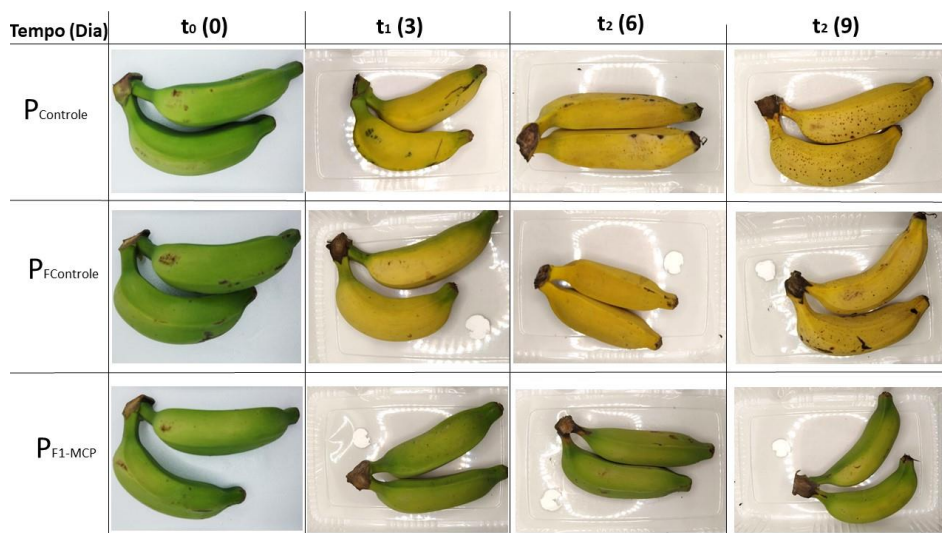
2.5.2. Preparação das bananas

Bananas ‘Prata’, após serem adquiridas, foram imediatamente transportadas, sob refrigeração, para a Planta Piloto de Processamento Mínimo de Vegetais do Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Lavras-MG. Inicialmente, os frutos foram divididos em buquês, contendo 2 frutos cada, e sanitizados, com solução de hipoclorito de sódio (100 ppm) por 15 min. Após drenada a solução, cada buquê foi acondicionado em suas respectivas embalagens.

2.5.3. Sistema de embalagem

Buquês constituídos por 2 frutos de banana ‘Prata’ foram acondicionados em embalagens PET. Em seguida, nano-sachês de MPN, em forma de discos (Figura 1 A) de aproximadamente 0,15 g, com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado (F_{1-MCP}), ou sem ele ($F_{Controle}$), foram acomodados em umas das extremidades da base de suas respectivas embalagens. Embalagens controle sem nano-sachê ($P_{Controle}$) e contendo nano-sachês $P_{F_{Controle}}$ e $P_{F_{1-MCP}}$ foram seladas com um filme flexível de PVC, conforme demonstrado na Figura 1 (B). Após seladas, as embalagens foram armazenadas, por até 9 dias, em câmara com controle de temperatura e umidade relativa (21 ± 2 °C e 90 ± 5 %, respectivamente). A umidade no *headspace* das embalagens foi de 95 ± 4 % ao longo dos dias de armazenamento.

Figura 1 – Representações do (A) sachê de nanofibra em forma de disco, do (B) sistema de embalagem com o sachê e o buque de bananas e dos (C) estádios de maturação (2, 4, 6 e 7) das bananas, com base na coloração da casca, nos diferentes tempos de armazenamentos (t_0 , t_1 , t_2 e t_3).



2.6. Análises de qualidade dos frutos

2.6.1. Taxa respiratória

Os buquês de banana ‘Prata’ foram retirados de suas respectivas embalagens e acondicionados em frascos de vidro de 900 mL, onde foram mantidos hermeticamente fechados por uma hora, sob as mesmas condições de armazenamento experimentais. Alíquotas de gases foram extraídas do *headspace* dos frascos e analisadas quanto ao CO₂ produzido, em analisador de gases PBI Dansensor Checkpoint 9900 (PBI-Dansensor A/S, Ringsted, Dinamarca). Os resultados foram expressos em mL de CO₂ kg de fruto⁻¹ h⁻¹.

2.6.2. Perda de massa

A perda de massa dos frutos ao longo do tempo foi avaliada por meio de pesagem em balança analítica, considerando o peso inicial dos frutos (0 dia) e o peso dos frutos no tempo de armazenamento avaliado (Eq. (2)). Embalagens exclusivas para a análise foram utilizadas, sendo pesadas sempre as mesmas amostras, a cada tempo de avaliação.

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left[\frac{(m_i - m_f)}{m_i} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Sendo,

m_i = massa inicial (t_0);

m_f = massa final (correspondente a cada tempo de armazenamento avaliado).

2.6.3. Determinações de acidez titulável (AT) e sólidos solúveis totais (SS)

A acidez titulável dos frutos foi determinada por titulação com solução de NaOH 0,1 M, utilizando como indicador a fenolftaleína e o teor de sólidos solúveis totais foi determinado por um refratômetro digital (Atago PAL-1, Tokyo, Japan) (AOAC International, 2016).

2.6.4. Firmeza

A firmeza dos frutos foi avaliada por teste de punctura, com auxílio de penetrômetro Magness – Taylor, utilizando sonda de 6 mm de diâmetro. Para isso, cada banana com a casca

foi dividida em três partes, com cortes perpendiculares ao eixo relativo ao comprimento do fruto, e a punctura realizada na polpa. Os resultados foram expressos em Newton (N).

2.6.5. Parâmetros de Cor

A análise de coloração das bananas foi realizada com auxílio do colorímetro Konica Minolta CR-400, iluminante D65, com determinação das variáveis L^* , a^* , b^* e ângulo Hue, em 6 pontos distintos do fruto, diretamente sobre a casca. O índice variação da cor total (ΔE) (Eq. (6)) foi calculado por meio das variações (ΔL^* , Δa^* e Δb^*) das variáveis a^* , b^* e L^* em seus respectivos tempos de armazenamento (t_1 , t_2 e t_3) quando comparas ao t_0 (L_0^* , a_0^* e b_0^*), conforme as Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5) (Muley & Singhal, 2020).

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Eq. (6)}$$

2.7. Análise Estatística

Os dados relativos às caracterizações das MPN e à qualidade dos frutos, com exceção dos resultados de FTIR e propriedades térmicas, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo as médias, quando significativas, comparadas pelo teste de média de Scott-knott com 5 % de significância utilizando o programa R versão 4.0.2.

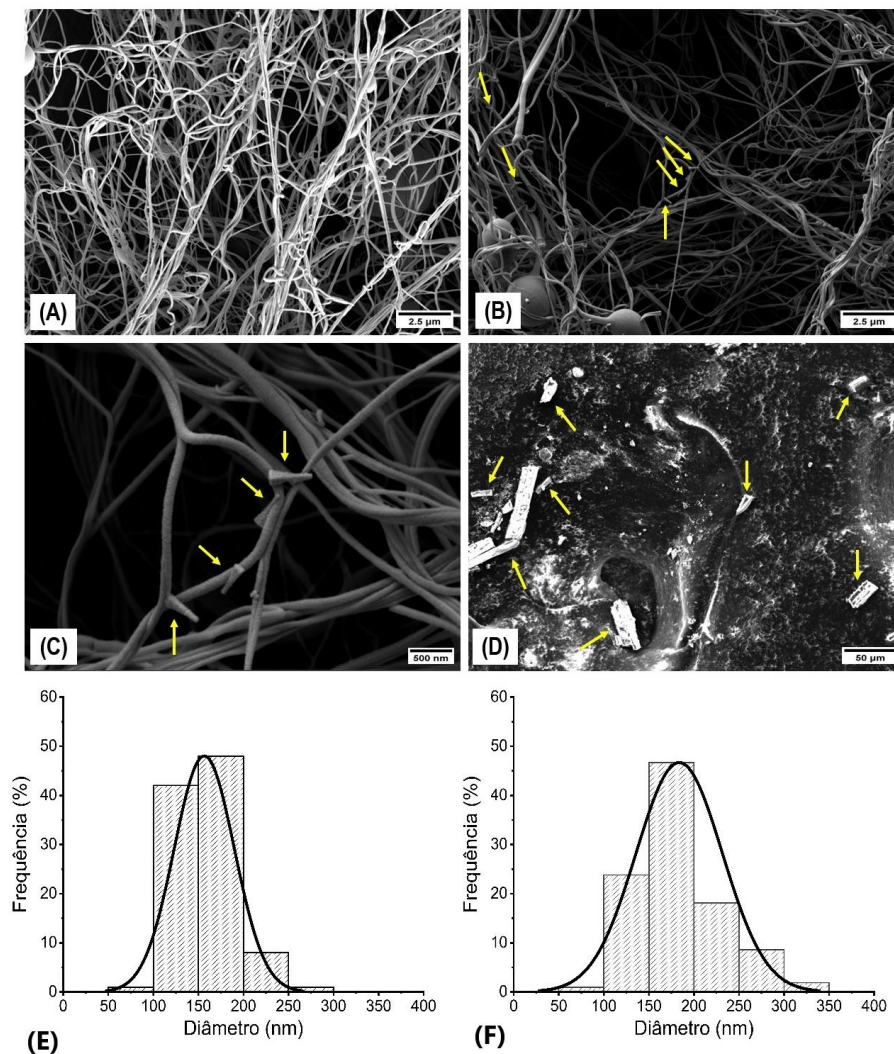
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização das mantas poliméricas nanoestruturadas (MPN)

3.1.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitou a caracterização da morfologia (Figuras 2 A e B) e do diâmetro (Figuras 2 E e F) das fibras que compõem as MPN das com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado (F_{1-MCP}), com indicação da presença de composto do 1-MCP, bem como permitiu constatar a presença do composto de 1-MCP na superfície das fibras F_{1-MCP} (Figuras 2 B, C e D).

Figura 2 – Micrografias das mantas poliméricas nanoestruturadas (MPN) de poli (ácido lático) (PLA) (A) controles (F_{Control}) na magnitude de $10000\times$ e com o 1-MCP encapsulado ($F_{1\text{-MCP}}$), com indicação da presença do 1-MCP, nas magnitudes de (B) $10000\times$ e (C) $80000\times$ e do (D) complexo 1-MCP/ α -CD em pó na magnitude de $1000\times$. Histogramas de distribuição dos diâmetros das fibras poliméricas (E) F_{Control} e (F) $F_{1\text{-MCP}}$.



Em relação à morfologia, as F_{Control} apresentaram superfícies mais uniformes e lisas, com pouca presença de *beads*, quando comparadas com as $F_{1\text{-MCP}}$ (Figuras 2 A e B, respectivamente). A maior ocorrência de *beads* na $F_{1\text{-MCP}}$ pode estar relacionada com o fato de que possivelmente os cristais do complexo 1-MCP/ α -CD encontram-se internamente encapsulados nas fibras. Além disso, com base nas micrografias de magnitude $10000\times$, também foi possível observar na superfície das $F_{1\text{-MCP}}$ (Figura 2 B) presença de partículas, sob a forma geométrica triangular, destacadas com setas, ocorrência que não foi observada nas extensões das F_{Control} (Figura 2 A). Dessa forma, para melhor investigar essa presença, foram feitas

micrografias das fibras F_{1-MCP} com magnitude de $80000\times$ (Figura 2 C) e do complexo 1-MCP/ α -CD em pó (Figura 2 D).

Os cristais do complexo 1-MCP/ α -CD, indicados por setas na Figura 2 (D), apresentaram diversos tamanhos e formatos (retangular, triangular, de losango, entre outras). Mura (2015) relataram que ciclodextrinas puras ou complexadas com outras substâncias, como foi o caso do complexo 1-MCP/ α -CD utilizado no presente estudo (Figura 2 D), podem apresentar diversas morfologias, assim como os formatos dos cristais também podem ser alterados dependendo do processamento a que são submetidos. Partindo desse pressuposto e levando-se em consideração que cristais na forma triangular também foram observados na Figura 2 (D), pode-se inferir que as partículas presentes nas superfícies das fibras F_{1-MCP} (Figuras 2 B e C) sejam alguns cristais do complexo 1-MCP/ α -CD que não foram encapsulados pelas fibras, e que sofreram redução do tamanho e mudança na morfologia causados pelo processo de fiação.

Nos histogramas, presentes nas Figura 2 (E e F), encontra-se a distribuição da frequência dos diâmetros das fibras $F_{Control}$ e F_{1-MCP} , respectivamente. Verificou-se que a maioria das fibras apresentou diâmetros entre 100 e 250 nm, embora também tenham sido encontradas fibras com diâmetros fora dessa faixa, mas em baixa proporção. Além de apresentar a maior variação de diâmetros de fibras (Figura 2 F), as fibras F_{1-MCP} apresentam maior diâmetro médio (184 nm) e diferiu estatisticamente pelo teste Scott-knott a 5 % ($p \leq 0,05$) das fibras $F_{Control}$ (157 nm). O diâmetro médio das fibras $F_{Control}$ encontrado no presente estudo foi semelhante ao encontrado por Brandão et al. (2023) e Miranda et al. (2021), que também produziram nanofibras de PLA (12 e 15 % m/v, respectivamente) por SBS. Essas semelhanças reforçam o entendimento de que o aumento do diâmetro, assim como as diferenças na morfologia e na maior ocorrência de *beads*, pode ser devido à influência da presença do complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado internamente, assim como na superfície das fibras F_{1-MCP} .

Pelo exposto e partindo do pressuposto de que materiais, como as fibras, podem ser considerados da escala nano quando apresentarem tamanhos de diâmetros inferiores a 1000 nm (Huang et al., 2019), constata-se que no presente estudo a fiação por SBS permitiu a produção de nanofibras poliméricas de PLA. Além disso, o fato de não ter ocorrido a completa encapsulação dos cristais do complexo 1-MCP/ α -CD e de eles estarem presentes nas superfícies das nanofibras pode contribuir para uma melhor dissociação do complexo 1-MCP/ α -CD, com conseqüente liberação do gás 1-MCP na presença de água ou de umidade elevada (Neoh et al., 2010, 2017).

3.1.2. Propriedades térmicas: Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

As curvas referentes à Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) das MPN estão dispostos na Figura 3 (A), assim como as propriedades térmicas estão descritas na Tabela 1. Deste modo, na Figura 3 (A), observa-se que todas as MPN desenvolvidas no presente estudo apresentaram um pico endotérmico localizado em, aproximadamente, 60 °C, o qual pode ser atribuído à temperatura de transição vítrea (T_g) do material e a processos de relaxamento (Burgos et al., 2013).

Figura 3 – Curvas de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) (A) e espectros de FTIR (B) das mantas poliéricas nanoestruturadas (MPN) de poli (ácido lático) (PLA) controle (F_{Controle}) e as com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado ($F_{1\text{-MCP}}$).

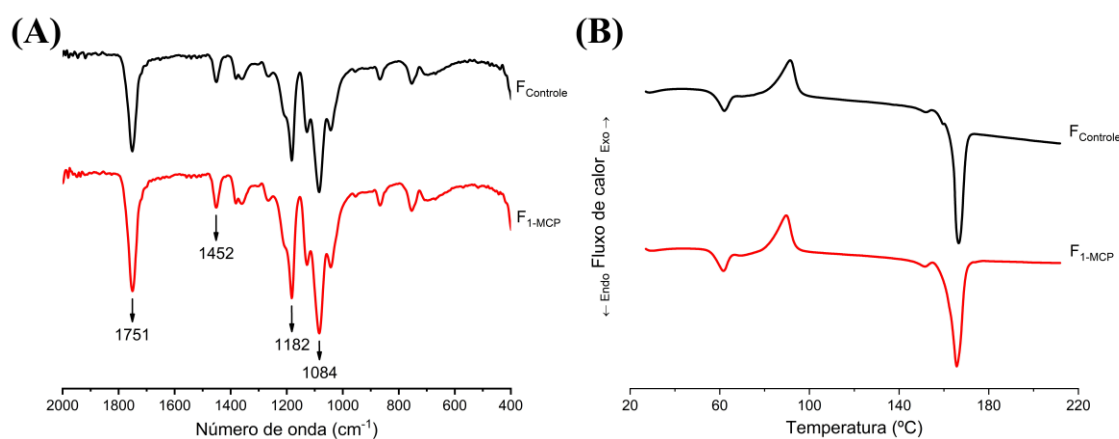


Tabela 1 – Propriedades térmicas das mantas poliméricas nanoestruturadas (MPN) de poli (ácido lático) (PLA) controle (F_{Controle}) e as com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado ($F_{1\text{-MCP}}$).

Propriedades térmicas	MPN de PLA	
	F_{Controle}	$F_{1\text{-MCP}}$
T_g (°C)	62	62
T_{cc} (°C)	91	89
T_{m1} (°C)	152	151
T_{m2} (°C)	166	166
X_c (%)	23	25

* T_g : Temperatura de transição vítrea; T_{cc} : Temperatura de cristalização a frio; T_{m1} e T_{m2} : Temperatura de fusão do primeiro e segundo pico, respectivamente e X_c : Grau de cristalinidade.

Um pico exotérmico em, aproximadamente, 90 °C, se formou devido a uma cristalização de parte da região amorfa do material. Já em, aproximadamente, 150 e 160 °C, encontram-se dois picos endotérmicos que podem estar relacionados com a fusão cristalina, indicando que

existem dois tipos de estrutura cristalina no material e, conseqüentemente, há duas temperaturas de fusão, a T_{m1} e T_{m2} , respectivamente. Esses dois picos endotérmicos indicam a presença dos tipos de cristais, α' e α , sendo a estrutura cristalina α' associada a T_{m1} por ser considerada uma estrutura imperfeita e com baixa estabilidade termodinâmica, e a estrutura cristalina α , formada por cristais com alta ordem estrutural, associada a T_{m2} (Burgos et al., 2013).

Com base nos resultados de DSC (Figura 3 A e Tabela 1), infere-se que a encapsulação do complexo 1-MCP/ α -CD pelas MPN de PLA não interferiu na temperatura de transição vítrea (T_g), tampouco na estrutura cristalina α' (T_{m1}). No entanto, o pico endotérmico associado à estrutura cristalina α se tornou mais largo e com menor T_{m2} , assim como também se notou redução expressiva, de 7,46 %, na temperatura de cristalização a frio (T_{cc}) do material e aumento de 1,95 % do grau de cristalização. Observações essas que permitem inferir que a presença do complexo 1-MCP/ α -CD induziu a cristalização do material, provavelmente, agindo como um agente nucleante, o qual promove uma heterogeneidade no sistema, permitindo a formação de mais cristais.

Uma encapsulação completa de um composto promove desorganização das cadeias poliméricas do material encapsulante, culminando na redução da cristalinidade (Mura, 2015; Sukumar et al., 2023). No entanto, como no presente estudo foi verificado o alargamento do pico (Figura 3 A) e redução T_{m2} , assim como o aumento do grau de cristalinidade (Tabela 1), supõe-se que o complexo 1-MCP/ α -CD em pó não tenha sido completamente encapsulado internamente, havendo também a presença de seus cristais na superfície das nanofibras, o que corrobora as observações realizadas com a análise de MEV (Figura 2).

3.1.3. Caracterização por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros obtidos a partir da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das F_{Controle} e $F_{1\text{-MCP}}$ apresentaram bandas características do PLA em, aproximadamente, 1754, 1452, 1182 e 1084 cm^{-1} , conforme destacado na Figura 3 (B). Tais bandas são referentes às vibrações de estiramento de C=O (1754 cm^{-1}), do estiramento do grupamento CH_3 (1452 cm^{-1}) e, do estiramento de C-O (1182 e 1084 cm^{-1}) (Min et al., 2021; Nguyen et al., 2013). O fato de não ter havido diferença significativa entre os espectros, não indica que o complexo 1-MCP/ α -CD não esteja presente no meio, mas que provavelmente a quantidade utilizada foi pequena ou que houve possível sobreposição ou mascaramento dos principais picos representativos do complexo 1-MCP/ α -CD pelas bandas do PLA (Mura, 2015).

3.1.4. Ângulo de contato

O ângulo de contato com a água é um parâmetro considerado para medir a sensibilidade à umidade das superfícies dos materiais, e quando ele é maior que 90° ($\theta > 90^\circ$) permite indicar que as superfícies são hidrofóbicas (Ertek et al., 2023). Logo, as MPN desenvolvidas apresentam hidrofobicidade, uma vez que os ângulos médios encontrados foram de 121° (F_{Controle}) e 114° ($F_{1\text{-MCP}}$). De fato, o PLA é um polímero com características hidrofóbicas (de Albuquerque et al., 2021). No entanto, a adição do complexo 1-MCP/ α -CD proporcionou uma redução estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) de 5,79 % na hidrofobicidade da superfície das MPN.

Essa redução está associada ao fato de o complexo 1-MCP/ α -CD utilizado apresentar um exterior hidrofílico (Blankenship & Dole, 2003; Neoh et al., 2017), conferindo às superfícies de $F_{1\text{-MCP}}$ uma maior afinidade com água, quando comparadas às de F_{Controle} . Ademais, a redução do ângulo de contato promovido pelo complexo 1-MCP/ α -CD confirma sua presença nas nanofibras, o que corrobora as análises de MEV (Figura 2) e de DSC (Figura 3 A e Tabela 1). O comportamento de $F_{1\text{-MCP}}$ é desejável, considerando-se sua possível aplicação como nano-sachê, partindo-se do princípio de que o teor de umidade no *headspace* das embalagens é elevado, visto que a água é um dos produtos finais do processo respiratório que continua acontecendo nos frutos. Acrescenta-se que as superfícies das MPN precisam ter certa afinidade com a umidade, para que haja a liberação do gás 1-MCP, embora um grau de hidrofobicidade seja importante para que continuem integras ao longo do armazenamento. Logo, a aplicação de $F_{1\text{-MCP}}$ como nano-sachê emissor de gás 1-MCP em sistema de embalagem destinada ao armazenamento de frutos torna-se justificável.

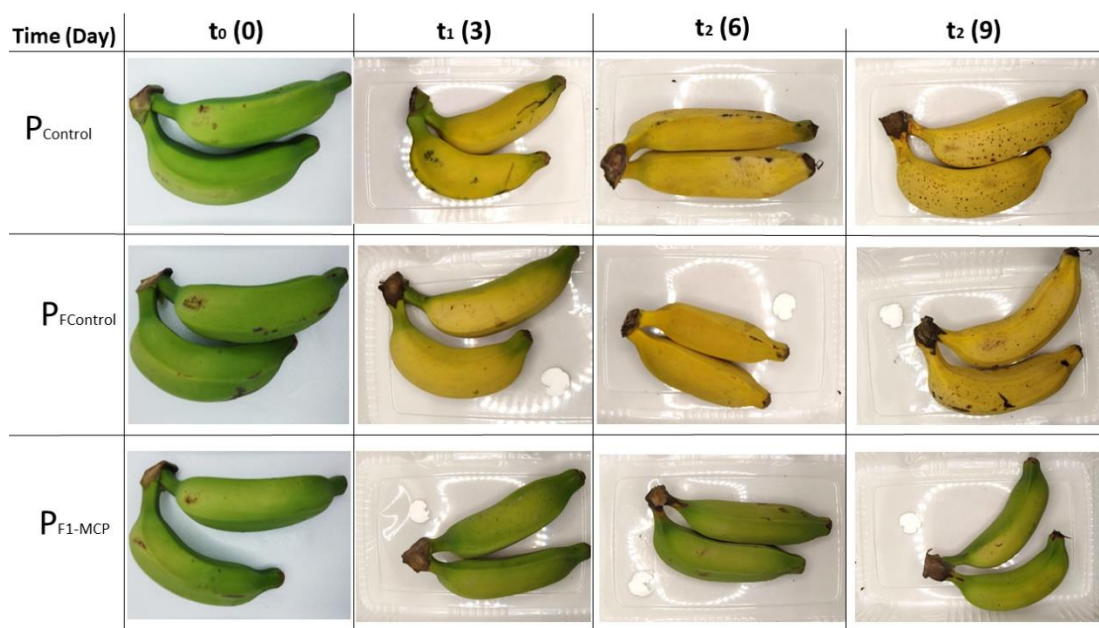
3.2. Aplicação de mantas poliméricas nanoestruturadas como nano-sachê de embalagens destinadas ao armazenamento de bananas

Com a finalidade de comprovar a ação e a viabilidade de aplicação, $F_{1\text{-MCP}}$ foram testadas *in vivo*, sendo aplicadas como nano-sachê em embalagens ($P_{F_{1\text{-MCP}}}$) destinados ao armazenamento de banana ‘Prata’ (Figura 1 B). Como controle positivo foram utilizadas embalagens com nano-sachês produzidos com MPN, sem 1-MCP ($P_{F_{\text{Controle}}}$) e como controle negativo (P_{Controle}), as mesmas embalagens, contudo sem qualquer tipo de sachê.

A evolução do amadurecimento da banana ‘Prata’, submetida aos diferentes tratamentos, é ilustrada na Figura 4. Essa figura deixa clara a efetividade do tratamento $P_{F_{1\text{-MCP}}}$

no controle do amadurecimento da banana ‘Prata’. As bananas P_{Control} e P_{FControl} apresentavam-se com a casca amarelada e as pontas verdes, já aos 3 dias de armazenamento, indicando já terem iniciado o processo de amadurecimento. Aos 6 dias encontravam-se completamente amareladas, sugerindo o pleno amadurecimento, e aos nove dias, amareladas com manchas senescentes. Já a casca da banana $P_{\text{F1-MCP}}$ permaneceu esverdeada, ao longo dos nove dias de armazenamento. Embora predominantemente verde, aos nove dias, traços de amarelo já eram observados na banana $P_{\text{F1-MCP}}$. A coloração da casca da banana é considerada um dos principais atributos de qualidade avaliado pelos consumidores e está ligada aos demais parâmetros de qualidade do fruto (Al-Dairi et al., 2023).

Figura 4 – Representações dos buquês das bananas da prata das embalagens controle, sem nano-sachê, (P_{Control}) e das com os nano-sachês de nanofibras controle (P_{FControl}) e de nanofibras com complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado ($P_{\text{F1-MCP}}$) nos tempos de armazenamento (0, 3, 6 e 9 dias).

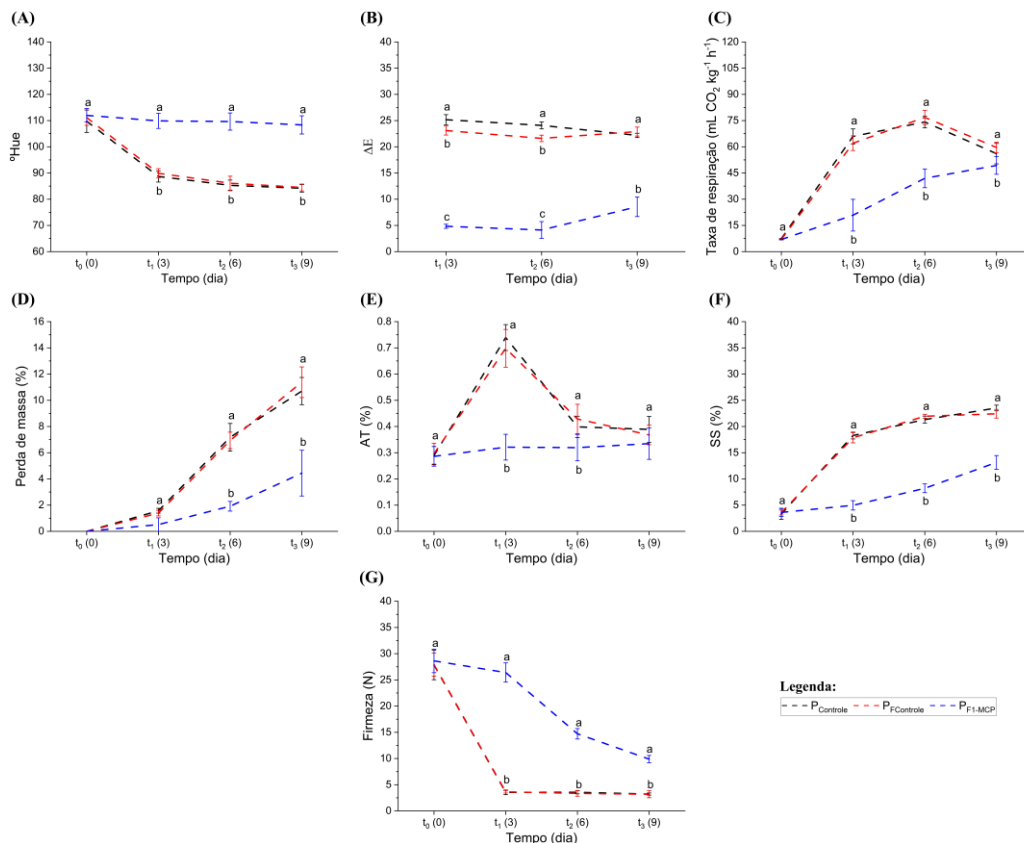


De fato, a mais flagrante alteração observada durante o amadurecimento de banana é a mudança na coloração de sua casca, que passa de verde a amarela, em função da degradação de clorofilas e síntese e, principalmente, desmascaramento de carotenoides pré-existentes. Com efeito, Ali et al. (2022) relatam que a degradação da clorofila em bananas ocorre em resposta ao aumento na produção de etileno, que induz o amadurecimento e instiga o desmascaramento de carotenoides pré-existentes e estáveis presentes na casca, a partir da ação de enzimas associadas ao catabolismo da clorofila, como clorofilase, feofitinaase, Mg-dechelataase e peroxidase (POD). Assim, as alterações mínimas observadas na casca da banana $P_{\text{F1-MCP}}$

sugerem a liberação do 1-MCP no *headspace* das embalagens e sua ligação aos sítios receptores do etileno, hormônio responsável pelo disparo e aceleração do amadurecimento em bananas.

Para corroborar os resultados visuais obtidos (Figura 4), os frutos foram submetidos a análises físicas e químicas. Na Figura 5 estão expostos os gráficos obtidos a partir das médias de °Hue, índice de variação da cor total (ΔE), taxa respiratória, perda de massa, acidez titulável, sólidos solúveis e firmeza de banana 'Prata' acondicionada em P_{Control} , P_{FControl} e $P_{\text{F1-MCP}}$ e armazenada por 9 dias. Já a partir do terceiro dia de armazenamento, bananas acondicionadas em $P_{\text{F1-MCP}}$ diferiram significativamente ($p \leq 0,05$) daquelas acondicionadas em P_{Control} e P_{FControl} , que não diferiram entre si ($p > 0,05$), a despeito da variável expressa na Figura 5. Visto que bananas no mesmo estágio de maturação (verde-maturas) foram utilizadas na montagem deste experimento, nenhuma diferença ($p > 0,05$) foi notada no tempo zero, em função dos tratamentos utilizados.

Figura 5 – Gráficos relativos ao (A) °Hue, (B) índice de variação de cor total (ΔE), (C) taxa respiratória, (D) perda de massa, (E) acidez titulável (AT), (F) sólidos solúveis (SS) e (G) firmeza de banana 'Prata' acondicionada em embalagens sem nano-sachê, (P_{Control}) e com nano-sachês de manta polimérica nanoestruturada controle (P_{FControl}) e com o complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado ($P_{\text{F1-MCP}}$) nos diferentes tempos de armazenamentos. Tratamentos seguidos das mesmas letras (dentro do mesmo tempo de armazenamento) não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5 % de significância ($p > 0,05$).



3.2.1. Parâmetros de cor

O °Hue das bananas verde-maturas, ponto de partida do experimento, situou-se em torno de 110° (Figura 5 A), o que confirma objetivamente a coloração verde dos frutos (Figura 4). Ao longo de 9 dias de armazenamento, o °Hue das bananas P_{F1-MCP} manteve-se relativamente estável, em torno de 110, embora uma tendência de leve queda tenha sido observada (Figura 5 A), chegando à 108,35° (t₃). Por outro lado, as bananas P_{Controle} e P_{FControle} apresentaram uma redução substancial no °Hue, mais marcante nos três primeiros dias de armazenamento e ao final (t₃) apresentaram ângulos médios de 84,17° e 84,49°, respectivamente (Figura 5 A), o que é condizente com a mudança na coloração da casca de verde para amarelo (Figura 4).

No caso dos índices de variação da cor total (ΔE) o crescimento dos valores observado na Figura 5 (B) indicam que as cores dos frutos apresentaram alterações ao logo do armazenamento. Além disso, apesar das diferenças significativas observadas entre todos os tratamentos ($p \leq 0,05$), o que de fato importa é que valores de ΔE superiores à 5 indicam que as diferenças entre as cores podem ser facilmente identificadas a olho nu (Miranda et al., 2020; Tassanawat et al., 2007). Dessa forma, como os índices de ΔE obtidos para as bananas P_{Controle} e P_{FControle} foram superiores à 20 (Figura 5 B), permite indicar que as alterações ocorridas do t₀ para os demais tempos foram mais expressivas e que podem ser facilmente percebidas a olho nu, conforme observa-se na Figura 4. Em contrapartida, das bananas P_{F1-MCP} só no t₃ que o valor de ΔE ultrapassou o 5, chegando a 8,56 (Figura 5 B), mesmo assim, a percepção das diferenças à olho nu ainda é sutil (Figura 4). Logo, as alterações nos valores de °Hue e ΔE sustentam a atribuição de efetividade do P_{F1-MCP}, com base na avaliação visual (Figura 4), na conservação de banana 'Prata'.

3.2.2 Taxa respiratória e perda de massa

A taxa respiratória é um marcador do metabolismo de frutos frescos e tem sido frequentemente utilizada como indicador de seu potencial de armazenamento, quanto maior taxa respiratória, menor esse potencial. O experimento foi iniciado com bananas verde-maturas, que apresentaram uma taxa respiratória média de 7,14 mL de CO₂ kg⁻¹ h⁻¹. Bananas acondicionadas em P_{Controle} e P_{FControle} apresentaram aumento na taxa respiratória nos seis primeiros dias de armazenamento, seguido de queda, enquanto aumento contínuo foi notado nas bananas acondicionadas em P_{F1-MCP}, ao longo de nove dias de armazenamento (Figura 5 C).

Além disso, a intensidade de aumento da taxa respiratória foi significativamente inferior nas bananas P_{F1-MCP} , que nas bananas submetidas aos demais tratamentos ($p \leq 0,05$; Figura 5 C).

O início do amadurecimento de frutos climatéricos, como a banana, normalmente é disparado pelo etileno e marcado pela ascensão na atividade respiratória, seguida de queda, fenômeno conhecido como climatério respiratório. Nota-se, claramente, que P_{F1-MCP} retardou o pico climatérico da banana, reduzindo significativamente sua atividade respiratória, o que se reflete no aumento da vida útil pós-colheita do fruto.

Partindo-se do princípio de que o climatério está relacionado ao etileno e taxa respiratória e que as taxas de produção de respiração e etileno de bananas são suprimidas pelo 1-MCP (Chang & Brecht, 2023), pode-se inferir que as bananas $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$ seguiram igualmente o processo de amadurecimento, ao longo de nove dias de armazenamento, enquanto a dissociação do gás 1-MCP do nano-sachê presente em P_{F1-MCP} , no *headspace* da embalagem, permitiu desacelerar o aumento da taxa respiratória e, subsequente, aparecimento do pico climatérico das bananas (Figura 5 C). Ariyanto & Yoshii, (2021) observaram o mesmo para maçãs, que também são frutos climatéricos, tratadas com papel revestido com 1-MCP e relacionaram esse comportamento com a redução da produção endógena do etileno. Entretanto, uma redução na sensibilidade dos frutos ao etileno endógeno, estimulado pelo 1-MCP, não pode ser descartada.

O amadurecimento da banana, como dos frutos climatéricos, em geral, está associado com a ocorrência de diversas mudanças bioquímicas, fisiológicas, nutricionais e sensoriais, que levam a um fruto maduro apto para o consumo (Al-Dairi et al., 2023; Ali et al., 2022; Hailu et al., 2013; Maduwanthi & Marapana, 2019; Sugianti et al., 2022). Com base nos resultados de atividade respiratória pode-se inferir que P_{F1-MCP} foi efetivo em retardar o amadurecimento de banana ‘Prata’, aumentando, conseqüentemente, sua vida útil pós-colheita.

Observou-se aumento na perda de massa da banana ‘Prata’, ao longo do armazenamento, significativamente menos intenso nos frutos sob P_{F1-MCP} , a partir do sexto dia ($p \leq 0,05$). A perda de massa notada nas bananas acondicionadas em P_{F1-MCP} aos nove dias (4,44 %) foi inferior àquela observada nos frutos $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$ aos seis dias de armazenamento. Ao final do armazenamento, bananas acondicionadas em $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$ atingiram perda de massa de 10,70 e 11,38 %, respectivamente. Perdas consideráveis de massa ocorrem após o início do amadurecimento de bananas, em função do aumento da atividade metabólica. Indubitavelmente, as perdas de água, seja pela respiração ou transpiração, são as principais responsáveis pela perda de massa dos frutos durante seu armazenamento. Isso pode levar ao seu enrugamento, alterações na textura, perda de suculência e redução da qualidade nutricional,

causando a redução do tempo de armazenamento (Al-Dairi et al., 2023; Hailu et al., 2013; Maduwanthi & Marapana, 2019; Sugianti et al., 2022). Logo, as diferenças relativas à perda de massa encontradas entre o tratamento P_{F1-MCP} e os demais ($P_{Controle}$ e $P_{FControle}$) (Figura 5 D) indicam o efeito positivo do P_{F1-MCP} no retardo do processo de amadurecimento da banana ‘Prata’.

Visto que a água e CO_2 são os produtos finais do processo respiratório, o aumento da atividade respiratória (Figura 5 C) observado nas bananas ‘Prata’ pode ser associado ao aumento de sua perda de massa (Figura 5 D) ao longo do armazenamento, menos intenso nos frutos acondicionados em P_{F1-MCP} . Esses resultados convergem com os de Sugianti et al. (2022), que associaram o aumento da atividade respiratória de bananas com o aumento de sua perda de massa.

3.2.3 Acidez titulável (AT), sólidos solúveis (SS) e firmeza

Notou-se aumento na AT dos frutos $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$, nos três primeiros dias de armazenamento, seguido de queda (Figura 5 E), enquanto aumento nos teores de SS e na taxa de amaciamento foi observado ao longo de todo armazenamento, embora de forma mais incisiva nos três primeiros dias de armazenamento (Figuras 5 F e G). Ressalta-se que o amaciamento é caracterizado pela queda da firmeza dos frutos. O aumento da AT, bem como o período de maior acúmulo de SS e amaciamento foi coincidente com a fase de maior atividade respiratória dos frutos, durante seu climatério (Figura 5 C). Essas informações, em conjunto, confirmam que o amadurecimento dos frutos $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$ foi disparado em algum momento, dentre os três primeiros dias de armazenamento. Por outro lado, as médias de AT, SS e firmeza dos frutos P_{F1-MCP} (Figura 5 E, F e G), aos nove dias de armazenamento, foram inferiores às observadas nos frutos $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$, aos três dias. Isso demonstra que o tratamento P_{F1-MCP} foi hábil em retardar o início e desacelerar o amadurecimento da banana ‘Prata’. Esses resultados convergem para os de Ariyanto & Yoshii (2021), que relataram retardo do amadurecimento de maçãs embaladas, sob efeito de papel impregnado com 1-MCP complexado em α -ciclodextrina.

A AT média para todas as bananas no t_0 , foi de 0,29 %, sendo observado uma ligeira tendência crescente da AT ao longo do armazenamento para as bananas P_{F1-MCP} , com valor médio de 0,33 % no t_3 , conforme representado na Figura 5 (E). No entanto, foi verificado um aumento expressivo da AT dos frutos $P_{Controle}$ e $P_{FControle}$ no t_1 (0,74 e 0,70 %, respectivamente), seguida de uma redução no demais tempos (t_2 e t_3), chegando ao final dos 9 dias (t_3) com 0,39

e 0,37 %, respectivamente (Figura 5 E). Sabendo-se que a TA representa a soma dos ácidos orgânicos e que esses ácidos são considerados substratos essenciais do processo respiratório de bananas, infere-se que o aumento da AT observado (Figura 5 E) esteja relacionado com a síntese de ácidos orgânicos (Al-Dairi et al., 2023; Ali et al., 2022; Taiz et al., 2017). Já a redução notada nos frutos P_{Controle} e $P_{F\text{Controle}}$, a partir do terceiro dia de armazenamento (Figura 5 E), pode ser atribuída ao consumo dos ácidos orgânicos como substratos no metabolismo respiratório, devido à atividade metabólica significativamente maior no começo do amadurecimento (Ali et al., 2022). O comportamento da TA, ao longo do amadurecimento de banana ‘Prata’, é coerente com o reportado por outros autores (Al-Dairi et al., 2023; Maduwanthi & Marapana, 2019).

De modo geral, as bananas P_{Controle} e $P_{F\text{Controle}}$ apresentaram um maior crescimento do teor de sólidos solúveis (SS) ao longo do período de armazenamento de 9 dias, cujos valores foram de 3,32 (P_{Controle}) e 3,59 % ($P_{F\text{Controle}}$) para 23,54 e 22,09 %, respectivamente (Figura 5 F). Em contraste, a aplicação do nano-sachê emissor do gás 1-MCP, além de retardar o acréscimo da AT (Figura 5 E), também promoveu o atraso do aumento da porcentagem média de SS das bananas $P_{F1\text{-MCP}}$, as quais foram de 3,60 % (t_0) para 13,14 % (t_3) (Figura 5 F). O aumento nos SS está associado, principalmente, à conversão do amido em açúcares, os principais representantes dos SS em banana. De fato, os SS são, geralmente, utilizados para representar o grau de doçura de frutas climatéricas, incluindo bananas. Logo, o crescimento dos SS (Figura 5 F) está associado ao aumento da doçura das bananas P_{Controle} e $P_{F\text{Controle}}$, durante o seu amadurecimento. Ali et al. (2022) salientam que há uma correlação positiva entre SS e perda de massa, produção de etileno e taxa respiratória, durante o amadurecimento de bananas. Com efeito, o aumento simultâneo dos SS (Figura 5 F), perda de massa (Figura 5 D) e atividade respiratória (Figura 5 C) foi notado durante o amadurecimento da banana ‘Prata’.

A firmeza refere-se à facilidade com que fruto irá ser esmagado por compressão e, geralmente, é um critério útil para determinar a qualidade alimentar da banana madura (Al-Dairi et al., 2023; Barros et al., 2020). Dessa forma, no decorrer do armazenamento foi possível verificar que houve redução da firmeza nas bananas de todos os tratamentos, sendo menos acentuada nas bananas da embalagem com nano-sachê de nanofibra emissor de 1-MCP ($P_{F1\text{-MCP}}$), conforme observa-se na Figura 5 (G). Inicialmente (t_0), todas as bananas avaliadas no presente estudo apresentaram uma firmeza média de 28,12 N, mas com 3 dias de armazenamento (t_1) as firmezas das bananas P_{Controle} e $P_{F\text{Controle}}$ reduziram expressivamente para 3,54 e 3,64 N, respectivamente, e ao final dos 9 dias (t_3), os valores ficaram em 3,22 e 3,35 N, respectivamente.

Em contrapartida, os frutos P_{F1-MCP} se mostraram mais firmes ao longo do armazenamento, apresentando uma firmeza média de 9,88 N aos nove dias de armazenamento (Figura 5 G). Esse valor, observado aos nove dias, é superior ao observado nos frutos submetidos aos demais tratamentos, já aos três dias de armazenamento, o que confirma os benéficos efeitos da liberação do gás 1-MCP e a viabilidade do nano-sachê de F_{1-MCP} . Ariyanto & Yoshii (2021), relataram que a firmeza da polpa de maçãs tratadas com papel revestido com 1-MCP foi maior do que de maçãs controle e concluíram que o amolecimento da polpa desses frutos climatéricos está associado à produção de etileno. Partindo desse pressuposto e ciente de que em bananas com menor produção de etileno apresentam maior firmeza quando comparadas com frutos com produção normal (Ali et al., 2022), é possível indicar que a presença do gás 1-MCP retardou as reações enzimáticas relativas ao amolecimento dos frutos, corroborando os comportamentos observados para os parâmetros de cor, taxa respiratória, perda de massa, TA e SS (Figuras 5).

Assim como acontece com o aumento dos SS, a redução da firmeza ao longo do amadurecimento de bananas está relacionada com a hidrólise dos grânulos de amido, embora a solubilização das substâncias pécticas também esteja envolvida (Chen et al., 2022; L. Zhu et al., 2021), além de perdas transpiracionais e osmóticas, de água da casca para polpa e da casca para o meio ambiente. Das enzimas relacionadas à perda de firmeza, também entendida como amaciamento do fruto, destacam-se as amilases, embora as enzimas de parede celular não possam ser descartadas. Muitas pesquisas têm indicado que o amadurecimento de frutos climatéricos, como banana, é invariavelmente acompanhado pelo aumento da atividade de enzimas degradadoras da parede celular, o que coincide com o seu amaciamento (Al-Dairi et al., 2023; Ali et al., 2022; Barros et al., 2020; Chen et al., 2022; L. Zhu et al., 2021). Além disso, Ali et al., (2022) verificaram que a atividade de enzimas de parede celular, como celulase (CX), poligalacturonase (PG), pectina metilesterase (PME) e β -glicosidase (β -Glu) se correlacionou positivamente com a produção de etileno e taxa respiratória (Ali et al., 2022).

O amarelecimento da casca, o amaciamento da polpa e aperfeiçoamento de seu sabor, especialmente seu adoçamento, são as alterações mais flagrantes associadas ao amadurecimento da banana. Essas alterações ocorrem de forma mais intensa durante o climatério respiratório do fruto, disparado pelo etileno, o que leva ao aumento de sua perda de massa. Logo, coordenando-se os resultados, nota-se que o nano-sachê elaborado com MPN de PLA com o complexo 1-MCP/ α -CD retardou o início, bem como desacelerou o amadurecimento de banana 'Prata'. Isso sugere a liberação do 1-MCP, a partir do nano-sachê, no *headspace* da embalagem e sua ligação aos sítios receptores do etileno. Tendo seus sítios ocupados, pelo menos parcialmente, o etileno

demoraria mais para disparar o gatilho do amadurecimento e, quando disparado, o processo se daria de forma mais lenta.

4. CONCLUSÕES

A técnica SBS é efetiva para o desenvolvimento de nanofibras poliméricas de PLA com complexo 1-MCP/ α -CD encapsulado. As determinações de MEV, DSC e ângulo de contato permitiram concluir que, além de estar encapsulado internamente, os cristais do complexo 1-MCP/ α -CD também estão presentes na superfície das nanofibras.

Nano-Sachês de MPN de PLA com o complexo 1-MCP/ α -CD aplicados em sistemas de embalagem são alternativas efetivas no retardo e desaceleração do amadurecimento de banana ‘Prata’, despontando-se como tecnologia viável e promissora no prolongamento da vida útil de frutas e hortaliças.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Análises e Prospecção Química (CAPQ) e aos Laboratórios de Energias Renováveis e Materiais Avançados (LABERMA) e de Microscopia Eletrônica e Análise Ultra estrutural (LME) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), e pelo apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Bolsas de Produtividade em Pesquisa 302259/2018-0, 302699/2019-8, 404716/2021-0, 405802/2022-6, 305880/2021-7, CNPq, Brasil), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (88881.068456/2014-01, 88881.200497/2018-01, CAPES, Brasil), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (PPM-00355-17, APQ-01505-15, BPD-00406-22, APQ-00516-22, APQ-00413-22, FAPEMIG, Brasil), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP, Brasil), a Universidade Federal de Lavras (UFLA, Lavras, Minas Gerais, Brasil).

REFERÊNCIAS

- Ademakinwa, A. N., & Agunbiade, M. O. (2022). Banana peel wastes as a source of tyrosinase useful in the production of l-DOPA. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100853. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100853>
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., Jayasuriya, H., & Al-Attabi, Z. (2023). Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: A

- review. *Trends in Food Science & Technology*.
<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.03.003>
- Ali, S., Ullah, M. A., Nawaz, A., Naz, S., Shah, A. A., Gohari, G., Razavi, F., Khaliq, G., & Razzaq, K. (2022). Carboxymethyl cellulose coating regulates cell wall polysaccharides disassembly and delays ripening of harvested banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *191*, 111978. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111978>
- AOAC International. (2016). *Official methods of Analysis* (Jr. George W. Latimer, Ed.; 20th ed.). AACC International.
- Ariyanto, H. D., & Yoshii, H. (2021). Fruit Packaging with 1-Methylcyclopropene Included in Alpha-Cyclodextrin. *Functionality of Cyclodextrins in Encapsulation for Food Applications*, 299–313. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80056-7_15
- Barhoum, A., Pal, K., Rahier, H., Uludag, H., Kim, I. S., & Bechelany, M. (2019). Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. *Applied Materials Today*, *17*, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>
- Barros, H. E. A. de, Silva, L. M. dos S. F. e, Natarelli, C. V. L., Oliveira, A. L. M. de, Abreu, D. J. M. de, Carvalho, E. E. N., & Boas, E. V. de B. V. (2020). Changes in physical and biochemical aspects during fruit ripening of banana cultivars (*Musa* spp.). *Research, Society and Development*, *9*(9), e596997618. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7618>
- Blankenship, S. M., & Dole, J. M. (2003). 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharvest Biology and Technology*, *28*(1), 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00246-6)
- Brandão, R. M., Batista, L. R., de Oliveira, J. E., Barbosa, R. B., Nelson, D. L., & Cardoso, M. G. (2023). In vitro and in vivo efficacy of poly(lactic acid) nanofiber packaging containing essential oils from *Ocimum basilicum* L. and *Ocimum gratissimum* L. against *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus niger* in table grapes. *Food Chemistry*, *400*, 134087. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134087>
- Burgos, N., Martino, V. P., & Jiménez, A. (2013). Characterization and ageing study of poly(lactic acid) films plasticized with oligomeric lactic acid. *Polymer Degradation and Stability*, *98*(2), 651–658. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.11.009>
- Carrasco, F., Pagès, P., Gámez-Pérez, J., Santana, O. O., & MasPOCH, M. L. (2010). Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, *95*(2), 116–125. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2009.11.045>

- Chang, L. Y., & Brecht, J. K. (2023). Responses of 1-methylcyclopropene (1-MCP)–treated banana fruit to pre– and post–treatment ethylene exposure. *Scientia Horticulturae*, *309*, 111636. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.111636>
- Chen, J., Li, Y., Li, F., Hong, K., & Yuan, D. (2022). Effects of procyanidin treatment on the ripening and softening of banana fruit during storage. *Scientia Horticulturae*, *292*, 110644. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110644>
- Chen, J., Li, Y., Li, F., Yuan, D., & Hong, K. (2023). Physiological and transcriptomic analysis reveals the postharvest ripening differences between “Nantianhuang” and “Brazilian” banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *195*, 112138. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.112138>
- de Albuquerque, T. L., Marques Júnior, J. E., de Queiroz, L. P., Ricardo, A. D. S., & Rocha, M. V. P. (2021). Polylactic acid production from biotechnological routes: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *186*, 933–951. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.07.074>
- Debabandya, M., Sabyasachi, M., & Namrata, S. (2010). Banana and its by-product utilization: an overview. *Journal of Scientific and Industrial Research*, *69*, 323–329.
- Dias, C., Ribeiro, T., Rodrigues, A. C., Ferrante, A., Vasconcelos, M. W., & Pintado, M. (2021). Improving the ripening process after 1-MCP application: Implications and strategies. *Trends in Food Science & Technology*, *113*, 382–396. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.012>
- Ertek, D. A., Sanli, N. O., Menciloglu, Y. Z., & Avaz Seven, S. (2023). Environmentally friendly, antibacterial materials from recycled keratin incorporated electrospun PLA films with tunable properties. *European Polymer Journal*, *185*, 111804. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2022.111804>
- Frone, A. N., Berlioz, S., Chailan, J.-F., & Panaitescu, D. M. (2013). Morphology and thermal properties of PLA–cellulose nanofibers composites. *Carbohydrate Polymers*, *91*(1), 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.054>
- Hailu, M., Workneh, T. S., & Belew, D. (2013). Review on postharvest technology of banana fruit. *African Journal of Biotechnology*, *12*(7).
- Huang, Y., Song, J., Yang, C., Long, Y., & Wu, H. (2019). Scalable manufacturing and applications of nanofibers. *Materials Today*, *28*, 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.04.018>
- Li, X., Xiong, T., Zhu, Q., Zhou, Y., Lei, Q., Lu, H., Chen, W., Li, X., & Zhu, X. (2023). Combination of 1-MCP and modified atmosphere packaging (MAP) maintains banana

- fruit quality under high temperature storage by improving antioxidant system and cell wall structure. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112265. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112265>
- Maduwanthi, S. D. T., & Marapana, R. A. U. J. (2019). Induced Ripening Agents and Their Effect on Fruit Quality of Banana. *International Journal of Food Science*, 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/2520179>
- Medeiros, E. S., Glenn, G. M., Klamczynski, A. P., Orts, W. J., & Mattoso, L. H. C. (2009). Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(4), 2322–2330. <https://doi.org/10.1002/app.30275>
- Min, T., Sun, X., Yuan, Z., Zhou, L., Jiao, X., Zha, J., Zhu, Z., & Wen, Y. (2021). Novel antimicrobial packaging film based on porous poly(lactic acid) nanofiber and polymeric coating for humidity-controlled release of thyme essential oil. *LWT*, 135, 110034. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110034>
- Miranda, K. W. E., Bresolin, J. D., Natarelli, C. V. L., Benevides, S. D., Bastos, M. do S. R., Mattoso, L. H. C., & de Oliveira, J. E. (2021). Potential use of poly(lactic acid) nanofibers mats as Nano-sachets in postharvest of climacteric fruits and vegetables. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(30), 50735. <https://doi.org/10.1002/APP.50735>
- Miranda, K. W. E., Natarelli, C. V. L., Thomazi, A. C., Ferreira, G. M. D., Frota, M. M., Bastos, M. do S. R., Mattoso, L. H. C., & Oliveira, J. E. (2020). Halochromic Polystyrene Nanofibers Obtained by Solution Blow Spinning for Wine pH Sensing. *Sensors*, 20(2), 417. <https://doi.org/10.3390/s20020417>
- Muley, A. B., & Singhal, R. S. (2020). Extension of postharvest shelf life of strawberries (*Fragaria ananassa*) using a coating of chitosan-whey protein isolate conjugate. *Food Chemistry*, 329, 127213. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127213>
- Mura, P. (2015). Analytical techniques for characterization of cyclodextrin complexes in the solid state: A review. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 113, 226–238. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2015.01.058>
- Neoh, T. L., Ariyanto, H. D., Menéndez Galvan, P., & Yoshii, H. (2017). Controlled release of 1-methylcyclopropene from its functionalised electrospun fibres under constant and linearly ramped humidity. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1325520>, 34(10), 1690–1702. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1325520>
- Neoh, T. L., Koecher, K., Reineccius, G., Furuta, T., & Yoshii, H. (2010). Dissociation characteristic of the inclusion complex of cyclomaltohexaose (α -cyclodextrin) with 1-

- methylcyclopropene in response to stepwise rising relative humidity. *Carbohydrate Research*, 345(14), 2085–2089. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2010.07.006>
- Nguyen, T. T. T., Ghosh, C., Hwang, S.-G., Tran, L. D., & Park, J. S. (2013). Characteristics of curcumin-loaded poly (lactic acid) nanofibers for wound healing. *Journal of Materials Science*, 48(20), 7125–7133. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7527-y>
- Ni, X., Yu, J., Shao, P., Yu, J., Chen, H., & Gao, H. (2021). Preservation of *Agaricus bisporus* freshness with using innovative ethylene manipulating active packaging paper. *Food Chemistry*, 345, 128757. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128757>
- Panahirad, S., Naghshiband-Hassani, R., Bergin, S., Katam, R., & Mahna, N. (2020). Improvement of Postharvest Quality of Plum (*Prunus domestica* L.) Using Polysaccharide-Based Edible Coatings. *Plants 2020*, Vol. 9, Page 1148, 9(9), 1148. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9091148>
- Pongprasert, N., & Srilaong, V. (2014). A novel technique using 1-MCP microbubbles for delaying postharvest ripening of banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 95, 42–45. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2014.04.003>
- Shi, C., Fang, D., Huang, C., Lyu, L., Wu, W., & Li, W. (2023). Electrospun biopolymer material for antimicrobial function of fresh fruit and vegetables: Application perspective and challenges. *LWT*, 174, 114374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114374>
- Sugianti, C., Imaizumi, T., Thammawong, M., & Nakano, K. (2022). Recent Postharvest Technologies in the Banana Supply Chain. *Reviews in Agricultural Science*, 10(0), 123–137. https://doi.org/10.7831/ras.10.0_123
- Sukumar, A., Gurumoorthi, P., & Athmaselvi, K. A. (2023). Effect of ultrasonication on emulsion formulation, encapsulation efficiency, and oxidative stability of spray dried chia seed oil. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05716-0>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. max, & Murphy, A. (2017). Fisiologia e desenvolvimento vegetal. In *Artmed* (6th ed.).
- Tassanawat, S., Phandee, A., Magaraphan, R., Nithitanakul, M., & Manuspiya, H. (2007). pH-Sensitive PP/Clay Nanocomposites for Beverage Smart Packaging. *2007 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 478–482. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2007.352062>
- Tawakkal, I. S. M. A., Cran, M. J., Miltz, J., & Bigger, S. W. (2014). A Review of Poly(Lactic Acid)-Based Materials for Antimicrobial Packaging. *Journal of Food Science*, 79(8), R1477–R1490. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12534>

- Teixeira, L. R., Sinisterra, R. D., Vieira, R. P., Scarlatelli-Lima, A., Moraes, M. F. D., Doretto, M. C., Denadai, Â. M., & Beraldo, H. (2006). An inclusion compound of the anticonvulsant sodium valproate into α -cyclodextrin: Physico-chemical characterization. *Journal of Inclusion Phenomena*, *54*(1–2), 133–138. <https://doi.org/10.1007/S10847-005-5817-Y/METRICS>
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., Raghavan, P., & Kessler, M. R. (2014). Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *2*(5), 1072–1092. <https://doi.org/10.1021/sc500087z>
- von Loesecke, H. W. (1950). *Bananas: Chemistry, Physiology, Technology* (2nd Revised, Vol. 1). Interscience Publishers.
- Xu, W. T., Huang, K. L., Guo, F., Qu, W., Yang, J. J., Liang, Z. H., & Luo, Y. B. (2007). Postharvest grapefruit seed extract and chitosan treatments of table grapes to control *Botrytis cinerea*. *Postharvest Biology and Technology*, *46*(1), 86–94. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2007.03.019>
- Zhu, L., Shan, W., Wu, C., Wei, W., Xu, H., Lu, W., Chen, J., Su, X., & Kuang, J. (2021). Ethylene-induced banana starch degradation mediated by an ethylene signaling component MaEIL2. *Postharvest Biology and Technology*, *181*, 111648. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111648>
- Zhu, X., Li, Q., Li, J., Luo, J., Chen, W., & Li, X. (2018). Comparative Study of Volatile Compounds in the Fruit of Two Banana Cultivars at Different Ripening Stages. *Molecules*, *23*(10), 2456. <https://doi.org/10.3390/molecules23102456>
- Zhu, X., Shen, L., Fu, D., Si, Z., Wu, B., Chen, W., & Li, X. (2015). Effects of the combination treatment of 1-MCP and ethylene on the ripening of harvested banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *107*, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.04.010>