



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

BEATRIZ VENTURA MARTINS

**OTIMIZAÇÃO DE FILME INTELIGENTE BIODEGRADÁVEL UTILIZANDO PÓ LIOFILIZADO
DE BATATA-DOCE DE POLPA ROXA (*Ipomoea batatas* (L.) LAM) PARA MONITORAMENTO EM
TEMPO REAL DA QUALIDADE DOS LEITES BOVINO E CAPRINO**

SEROPÉDICA
2026



BEATRIZ VENTURA MARTINS

**OTIMIZAÇÃO DE FILME INTELIGENTE BIODEGRADÁVEL UTILIZANDO PÓ
LIOFILIZADO DE BATATA-DOCE DE POLPA ROXA (*Ipomoea batatas* (L.) LAM) PARA
MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA QUALIDADE DOS LEITES BOVINO E
CAPRINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de concentração: Ciência de Alimentos.

Orientador(a): Elisa Helena da Rocha Ferreira

Coorientador(a): João Victor Nicolini

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Central de Processamento
Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pela autora

M379o Martins, Beatriz Ventura, 1998-
OTIMIZAÇÃO DE FILME INTELIGENTE BIODEGRADÁVEL
UTILIZANDO PÓ LIOFILIZADO DE BATATA-DOCE DE POLPA ROXA
(Ipomoea batatas (L.) LAM) PARA MONITORAMENTO EM TEMPO
REAL DA QUALIDADE DOS LEITES BOVINO E CAPRINO /
Beatriz Ventura Martins. - Rio de Janeiro, 2026.
98 f.

Orientadora: Elisa Helena da Rocha Ferreira.
Coorientador: João Victor Nicolini.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em
Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2026.

1. Filmes inteligentes. 2. Antoncianinas. 3. Leite
de vaca. 4. Leite de cabra. 5. Indicador de pH. I.
Ferreira, Elisa Helena da Rocha, 1977-, orient. II.
Nicolini, João Victor, 1986-, coorient. III
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa
de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos.
IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte

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

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

BEATRIZ VENTURA MARTINS

**OTIMIZAÇÃO DE FILME INTELIGENTE BIODEGRADÁVEL UTILIZANDO PÓ
LIOFILIZADO DE BATATA-DOCE DE POLPA ROXA (*Ipomoea batatas* (L.) LAM) PARA
MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA QUALIDADE DOS LEITES BOVINO E
CAPRINO**

Trabalho Final de Dissertação submetida
como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre no Programa de Pós
Graduação de Ciência e Tecnologia de
Alimentos, Área de concentração em
Ciência de Alimentos.

Trabalho Final de Dissertação aprovada em 31 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **JOAO VICTOR NICOLINI**
Data: 28/08/2026 10:00:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

João Victor Nicolini - Co-orientador – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **HELEN CONCEICAO FERRAZ**
Data: 21/08/2026 15:47:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Helen Conceição Ferraz - Membro externo – UFRJ

Documento assinado digitalmente
 **MARIA TOLEDO DE CARVALHO SILVA**
Data: 19/08/2026 17:59:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mariá Toledo de Carvalho Silva - Membro externo – UNIVASSOURAS

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo amor incondicional, apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos. Obrigada por acreditarem em mim, celebrarem minhas conquistas e me lembrarem da importância de nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu namorado, Vinicius, por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo desta caminhada. Obrigada por estar ao meu lado nos momentos mais desafiadores e por tornar essa trajetória mais leve.

À minha orientadora, Prof.^a Dra. Elisa Helena da Rocha Ferreira, pela confiança, dedicação, paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante todos estes anos de trabalho. Sua orientação foi fundamental para meu crescimento científico e profissional.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. João Victor Nicolini, pelas contribuições, disponibilidade e apoio ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelos conhecimentos transmitidos e pela contribuição à minha formação acadêmica.

Aos colegas de laboratório e de pós-graduação, pela convivência, pelas trocas de conhecimento, pelas conversas, pelo apoio mútuo e pelos momentos compartilhados.

Aos técnicos e funcionários dos laboratórios e da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelo suporte prestado durante a execução deste trabalho.

Aos meus sogros, Gislana e Daniel, pelo acolhimento, carinho e apoio durante essa etapa da minha vida. Sou grata por toda a atenção, afeto e por me fazerem sentir sempre bem-vinda.

Às agências de fomento e às instituições que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, seja por meio de infraestrutura, recursos ou apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória e contribuíram para a concretização deste sonho. Esta dissertação representa não apenas um trabalho acadêmico, mas também o resultado de anos de dedicação, aprendizado, superação e crescimento pessoal. A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

RESUMO

MARTINS, Beatriz Ventura. **OTIMIZAÇÃO DE FILME INTELIGENTE BIODegradável UTILIZANDO Pó LIOFILIZADO DE BATATA-DOCE DE POLPA ROXA (*Ipomoea batatas* (L.) LAM) PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA QUALIDADE DOS LEITES BOVINO E CAPRINO**. 2026. 98 folhas. Trabalho Final de Dissertação. Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

A cadeia produtiva do leite bovino e caprino enfrenta desafios relacionados à manutenção da qualidade e à redução de perdas ao longo da cadeia produtiva. Nesse contexto, o desenvolvimento de embalagens inteligentes biodegradáveis capazes de monitorar alterações nos alimentos em tempo real representa uma alternativa promissora para aumentar a segurança alimentar e reduzir desperdícios. Assim, o objetivo deste trabalho foi otimizar e caracterizar filmes inteligentes biodegradáveis incorporados com pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) para aplicação como indicador colorimétrico de pH em leites bovino e caprino. O pó liofilizado foi caracterizado quanto à composição química, teor de antocianinas e resposta colorimétrica em diferentes valores de pH. Posteriormente, os filmes foram produzidos utilizando amido, carboximetilcelulose, glicerol e diferentes concentrações de pó, sendo avaliadas suas propriedades mecânicas, ópticas, térmicas, espectroscópicas e de biodegradação. O pó apresentou 84,88% de carboidratos, 1,97% de cinzas, 5,32% de umidade e 31,20 mg 100 g⁻¹ de antocianinas monoméricas, além de ampla resposta colorimétrica entre pH 1 e 11. A incorporação do PLBD reduziu a luminosidade dos filmes, aumentou a intensidade da coloração e promoveu resposta visual às variações de pH, com mudanças de cor do rosa ao verde. As análises de FTIR indicaram que a adição do pó não comprometeu a estrutura química da matriz polimérica, enquanto os ensaios de biodegradação confirmaram a rápida degradação dos filmes em solo. Na aplicação prática, os filmes foram capazes de diferenciar amostras de leite bovino e caprino em diferentes condições de pH, incluindo amostras provenientes de animais sadios e com mastite, demonstrando potencial para o monitoramento visual da qualidade do leite. De modo geral, os filmes desenvolvidos apresentaram propriedades adequadas para aplicação como embalagens inteligentes biodegradáveis, constituindo uma alternativa sustentável para o monitoramento do frescor e da qualidade de produtos lácteos.

Palavras-chave: filmes inteligentes; leite bovino; leite caprino; batata-doce de polpa roxa; antocianinas; biodegradabilidade; indicador de pH.

ABSTRACT

MARTINS, Beatriz Ventura. **Optimization of a Biodegradable Intelligent Film Incorporating Freeze-Dried Purple-Fleshed Sweet Potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) Powder for Real-Time Monitoring of Bovine and Goat Milk Quality.** 2026. [98 pages]. Master's Thesis. Master's Degree in Food Science and Technology – Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

The dairy production chain faces significant challenges related to maintaining milk quality and reducing losses throughout production and distribution. In this context, the development of biodegradable intelligent packaging capable of monitoring food quality in real time has emerged as a promising strategy to improve food safety and minimize waste. Therefore, this study aimed to optimize and characterize biodegradable intelligent films incorporated with freeze-dried purple-fleshed sweet potato powder (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) for application as colorimetric pH indicators for bovine and goat milk. The freeze-dried powder was characterized in terms of chemical composition, anthocyanin content, and colorimetric response under different pH conditions. Subsequently, biodegradable films were produced using starch, carboxymethyl cellulose, glycerol, and different concentrations of purple-fleshed sweet potato powder. Their mechanical, optical, thermal, spectroscopic, and biodegradation properties were evaluated. The freeze-dried powder contained 84.88% carbohydrates, 1.97% ash, 5.32% moisture, and 31.20 mg 100 g⁻¹ of monomeric anthocyanins, exhibiting a broad colorimetric response over the pH range from 1 to 11. The incorporation of purple-fleshed sweet potato powder reduced film lightness, increased color intensity, and promoted visible color changes from pink to green in response to pH variations. FTIR analysis indicated that the addition of the powder did not compromise the chemical structure of the polymeric matrix, while soil burial tests confirmed the rapid biodegradation of the developed films. In the practical application, the films successfully differentiated bovine and goat milk samples with different pH values, including milk from healthy animals and animals with mastitis, demonstrating their potential for the visual monitoring of milk quality. Overall, the developed films exhibited suitable properties for application as biodegradable intelligent packaging, representing a sustainable alternative for monitoring the freshness and quality of dairy products.

Keywords: intelligent films; bovine milk; goat milk; purple sweet potato; anthocyanins; biodegradability; pH indicator.

Lista de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros de qualidade do leite de vaca cru, segundo a Instrução Normativa N° 76, de 26 de novembro de 2018 (MAPA).	20
Tabela 2. Parâmetros de qualidade do leite de cabra cru, segundo a Instrução Normativa N° 37, de 31 de outubro de 2000 (MAPA).	22
Tabela 3. Tipos de Embalagens Inteligentes, Sensores e Parâmetros Monitorados	23
Tabela 4. Polímero, fonte de antocianina, concentração e solvente da solução extratora, teor de antocianina do extrato, fonte de antocianina e quantidade de pigmento adicionado.	24
Tabela 5. Principais estudos sobre o desenvolvimento de filmes indicadores de pH utilizando antocianinas de batata-doce de polpa roxa	29
Tabela 6. Propriedades químicas de antocianidinas selecionadas e suas principais propriedades de cor.	33
Tabela 7. Aplicação de filmes indicadores de pH	34
Tabela 8. Quantidades de PLDB e solução de CMC a serem adicionadas.....	47
Tabela 9. Análise de cor do PLBD	52
Tabela 10. Parâmetros de caracterização do PLBD.....	56
Tabela 11. Avaliação subjetiva dos filmes	56
Tabela 12. Parâmetros colorimétricos (L, a, b*, C* e ΔE) e opacidade dos filmes	58
Tabela 13. Espessura dos diferentes filmes	62
Tabela 14. Ângulo de contato dos diferentes filmes.....	65
Tabela 15. Caracterização Mecânica	75
Tabela 16. Resposta colorimétrica dos filmes inteligentes em amostras de leite bovino provenientes de animais sadios, com mastite subclínica e mastite clínica.....	80

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama esquemático mostrando o conceito de embalagem inteligente.	23
Figura 2. Batata doce de polpa roxa	27
Figura 3. Estrutura química do íon flavílio.	32
Figura 4: Exemplos de como filmes indicadores de pH podem ser aplicados. (A) [Reproduzido com permissão de (Chen et al., 2020), © Elsevier BV]. (B) [Reproduzido com permissão de (Wang et al., 2022), © Elsevier BV]. (C) [Reproduzido com permissão de (Miao et al., 2023), © Elsevier BV]. (D) [Reproduzido com permissão de (Silva et al., 2023), © Elsevier BV]. (E) [Reproduzido com permissão de (Zhang et al., 2020), © Elsevier BV]. (F) [Reproduzido com permissão de (Liu et al., 2021), © Elsevier BV].	37
Figura 5. Exemplos de aplicação de filmes indicadores de pH. (A), (B) [reproduzido com permissão de (Gao et al., 2022), © Elsevier BV].	38
Figura 6. Pó liofilizado da batata doce de polpa roxa	52
Figura 7. Alterações de cor do PLBD em diferentes valores de pH.....	53
Figura 8. Alteração de cor dos filmes em diferentes soluções de pH.....	61
Figura 9. MEV dos Filmes 1, 3, 5, 7 e 9	64
Figura 10. Espectros de FTIR para os componentes do filme.....	68
Figura 11. Espectros de FTIR para os filmes com diferentes formulações.....	69
Figura 12. TGA dos filmes.....	72
Figura 13. TGA dos componentes dos filmes	73
Figura 14. DSC dos filmes	74
Figura 15. DSC dos componentes	74
Figura 16. Aplicação dos filmes em leites bovino e caprino reconstituídos	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO I.....	16
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Parâmetros de qualidade do leite bovino.....	20
1.2 Parâmetros de qualidade do leite caprino.....	21
1.3 Filmes inteligentes.....	22
1.4 Utilização de antocianinas de batata doce de polpa roxa em filmes inteligentes.....	26
1.5 Estratégias para obtenção e utilização de antocianinas de batata-doce de polpa roxa	30
1.6 Antocianinas.....	32
1.7 Aplicação dos Filmes Inteligentes no Monitoramento da Qualidade de Alimentos ...	34
2 CONCLUSÃO	38
CAPÍTULO II.....	40
1 INTRODUÇÃO.....	42
2 METODOLOGIA.....	44
2.1 Preparo do pó liofilizado de batata-doce (PLBD)	44
2.2 Rendimento	45
2.3 Alteração visual de cor do PLBD em soluções de diferentes valores de pH.....	45
2.4 Caracterização da BDPR e do PLBD	46
2.4.1 Composição.....	46
2.4.2 Teor de Antocianinas Monoméricas Totais (AMT).....	46
2.4.3 Preparo dos filmes.....	47
2.3 Caracterização dos filmes	48
2.3.1 Avaliação subjetiva dos filmes.....	48
2.3.2 Resposta colorimétrica dos filmes em soluções diferentes valores de pH.....	48

2.3.3 Caracterização física e química.....	48
2.3.4 Caracterização mecânica	49
2.3.5 Biodegradabilidade.....	49
2.3.6 Análise de cor.....	50
2.3.6 Curva modelo de alteração do pH do leite bovino e caprino	50
2.3.7 Aplicação prática dos filmes para o monitoramento do pH do leite bovino	51
2.4 Análise Estatística.....	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1 Liofilização, moagem e peneiramento.....	51
3.2 Rendimento	52
3.3 Análise de cor do PLBD	52
3.4 Alteração visual de cor do PLBD em soluções de diferentes valores de pH.....	53
3.5 Caracterização do PLBD	54
3.6 Avaliação subjetiva do filme	56
3.7 Análise de cor dos filmes.....	58
3.8 Resposta colorimétrica dos filmes em soluções de diferentes valores de pH.....	61
3.9 Caracterização físicas e químicas dos filmes.....	62
3.10 Caracterização mecânica dos filmes	75
3.11 Biodegradabilidade	77
3.12 Curva modelo de alteração do pH do leite bovino e caprino.....	77
3.13 Aplicação prática dos filmes para o monitoramento do pH do leite bovino.....	80
4. CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

A redução das perdas e do desperdício de alimentos ao longo da cadeia produtiva representa um dos principais desafios para a promoção da sustentabilidade dos sistemas alimentares. Além dos benefícios econômicos associados à diminuição das perdas, essa redução contribui diretamente para a segurança alimentar e nutricional, a preservação dos recursos naturais e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Tais aspectos tornam-se ainda mais relevantes diante das mudanças climáticas e do contínuo crescimento populacional mundial (FAO, 2019). Nesse contexto, a redução do desperdício de alimentos tornou-se uma prioridade global, sendo incorporada à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12 – Consumo e Produção Responsáveis, cuja meta prevê reduzir pela metade o desperdício per capita de alimentos nos níveis de varejo e consumo, além de minimizar as perdas ao longo das cadeias de produção e abastecimento até o ano de 2030 (ONU, 2015).

No setor de alimentos industrializados, uma parcela significativa dos produtos é descartada exclusivamente por atingir a data de validade, muitas vezes relacionada à perda da qualidade sensorial e não necessariamente à segurança microbiológica do alimento (FDA, 2019). Como consequência, inúmeros produtos ainda adequados para consumo sob os pontos de vista microbiológico e nutricional acabam sendo inutilizados. Em contrapartida, o consumo de alimentos deteriorados ou contaminados representa um importante problema de saúde pública. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), aproximadamente 600 milhões de pessoas adoecem anualmente em decorrência do consumo de alimentos contaminados, resultando em cerca de 420 mil mortes (OMS, 2022). No Brasil, dados do Ministério da Saúde indicam que aproximadamente 40% dos casos de Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar (DTHA) registrados nos últimos dez anos ocorreram no ambiente doméstico (Brasil, 2022).

Diante desse cenário, tecnologias capazes de monitorar a qualidade dos alimentos em tempo real vêm despertando crescente interesse por possibilitarem tanto a redução do desperdício de alimentos ainda seguros para consumo quanto a prevenção da ingestão de produtos impróprios (Etxabide; Kilmartin; Maté, 2021). Entre essas tecnologias destacam-se as embalagens inteligentes, definidas como sistemas capazes de monitorar alterações ocorridas no alimento ou na atmosfera da embalagem e transmitir essas informações ao longo de toda a cadeia produtiva por meio de sinais facilmente interpretáveis (Yam; Takhistov; Miltz, 2005). Além das funções convencionais de proteção física, química e microbiológica, essas embalagens fornecem informações relevantes sobre a qualidade, o armazenamento e a

distribuição dos alimentos, auxiliando fabricantes, distribuidores e consumidores na tomada de decisões (Kerry; O'grady; Hogan, 2006; Yam; Takhistov; Miltz, 2005).

Uma das principais estratégias utilizadas em embalagens inteligentes é a incorporação de indicadores capazes de monitorar alterações relacionadas à qualidade dos alimentos. Esses dispositivos podem responder a diferentes parâmetros, como temperatura, presença de oxigênio, alterações de pH e indicadores de frescor (Kalpana et al., 2019). Para sua aplicação em escala industrial, esses sistemas devem apresentar elevada sensibilidade, rápida resposta às alterações monitoradas, boa correlação com o estado de conservação do alimento, baixo custo de produção, simplicidade tecnológica e facilidade de interpretação visual pelos consumidores, sem necessidade de equipamentos auxiliares (Becerril; Nerín; Silva, 2021).

Os indicadores de frescor são dispositivos que respondem diretamente aos metabólitos produzidos durante o processo de deterioração dos alimentos, decorrente da atividade microbiológica e de reações químicas. Em geral, esses indicadores apresentam respostas colorimétricas facilmente perceptíveis, permitindo correlacionar visualmente a alteração de cor com o grau de deterioração do produto (Kuswandi, 2017). Essa resposta ocorre em função das mudanças na concentração de compostos produzidos durante a decomposição dos alimentos, como glicose, ácidos orgânicos, etanol, compostos nitrogenados voláteis, aminas biogênicas, dióxido de carbono e compostos sulfurados (Smolander, 2003).

Como muitos desses metabólitos provocam alterações no pH do alimento, os indicadores colorimétricos sensíveis ao pH tornaram-se uma das abordagens mais investigadas para o monitoramento da deterioração de diferentes produtos alimentícios (ALIZADEH-SANI et al., 2020). Esses dispositivos são normalmente constituídos por uma matriz polimérica associada a um pigmento sensível às variações de pH (ROY; RHIM, 2021), capaz de traduzir visualmente as mudanças ocorridas no alimento por meio de alterações de cor facilmente perceptíveis (JIANG et al., 2020; KIM et al., 2017; ZHANG et al., 2019).

Inicialmente, esses sistemas eram desenvolvidos utilizando polímeros e corantes sintéticos. Entretanto, a crescente demanda por materiais sustentáveis impulsionou o desenvolvimento de sensores produzidos a partir de biopolímeros e pigmentos naturais. Além de reduzirem o impacto ambiental, esses materiais apresentam vantagens como biodegradabilidade, renovabilidade, baixa toxicidade, ampla disponibilidade, facilidade de processamento e menor custo de produção (Alizadeh-Sani et al., 2020).

Entre os pigmentos naturais empregados na produção de filmes indicadores, as antocianinas destacam-se devido à elevada disponibilidade em diversas fontes vegetais, à segurança de uso, à atividade antioxidante e antimicrobiana e, principalmente, à capacidade de

apresentar mudanças estruturais reversíveis acompanhadas por alterações de cor em resposta às variações de pH (Rakić et al., 2019; Yin et al., 2023). Essas características tornam as antocianinas excelentes candidatas para o desenvolvimento de indicadores colorimétricos destinados ao monitoramento da qualidade e do frescor dos alimentos.

As antocianinas utilizadas nesses sistemas são geralmente obtidas por extração de diferentes fontes vegetais, incluindo repolho roxo (Cheng, M. et al., 2022; Liu, D. et al., 2021), casca de jabuticaba (Silva, N. M. et al., 2020), mirtilo (Bao et al., 2022; Kurek et al., 2019; Zhang et al., 2022), uva vermelha (Kurek et al., 2019), jambolão (Merz et al., 2020), hibisco (Zhang et al., 2019), folhas de manjerição roxo (Ebrahimi et al., 2022), arroz roxo (*riceberry*) (Eze; Jayeoye; Singh, 2022), cenoura roxa (Koosha; Hamed, 2019; Moazami Goodarzi et al., 2020) e batata-doce de polpa roxa (Chen, S. et al., 2020; Jiang et al., 2020; Zong et al., 2023). Entre essas fontes, a batata-doce de polpa roxa destaca-se por apresentar elevado teor de antocianinas aciladas, compostos que apresentam maior estabilidade frente às condições de processamento e armazenamento, ampliando seu potencial para aplicações em embalagens inteligentes.

O presente trabalho representa uma continuidade das pesquisas desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em filmes inteligentes biodegradáveis à base de amido, carboximetilcelulose e pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa. Em estudo anterior, Silva (2023) desenvolveu filmes indicadores de pH utilizando pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa para o monitoramento da qualidade de carne moída, demonstrando o potencial desse material como indicador colorimétrico. A partir desses resultados, o presente estudo amplia essa linha de pesquisa ao investigar novas formulações dos filmes, avaliar o efeito da granulometria, da concentração do pó e da sonicação sobre as propriedades da matriz filmogênica e, principalmente, explorar sua aplicação inédita no monitoramento da qualidade de leites bovino e caprino, incluindo amostras provenientes de animais saudáveis e com mastite.

Dessa forma, esta dissertação tem como objetivo otimizar e caracterizar filmes biodegradáveis inteligentes incorporados com pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa como indicadores colorimétricos de pH para aplicação no monitoramento da qualidade dos leites bovino e caprino.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Otimizar um filme inteligente biodegradável a partir de batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* (L.) LAM) para o monitoramento dinâmico da qualidade dos leites caprino e bovino.

2.2 Objetivos específicos

- Otimizar filme inteligente biodegradável a partir de pó liofilizado de batata doce de polpa roxa, avaliando suas propriedades físicas, químicas e mecânicas;
- Avaliar a estabilidade do filme inteligente biodegradável frente a diferentes condições de temperatura, luz e tempo de armazenamento;
- Aplicar o filme inteligente em amostras de leite bovino, e monitorar as alterações visuais (análise de cor);
- Correlacionar as mudanças de cor do filme com parâmetros de pH.

CAPÍTULO I

Filmes inteligentes à base de antocianinas de batata-doce de polpa roxa para monitoramento da qualidade do leite: uma revisão

CAPÍTULO I: Filmes inteligentes à base de antocianinas de batata-doce de polpa roxa para monitoramento da qualidade do leite: uma revisão

RESUMO

A cadeia produtiva do leite bovino e caprino possui grande relevância econômica e social no Brasil, porém enfrenta desafios relacionados à manutenção da qualidade e à redução das perdas ao longo da produção, armazenamento e comercialização. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias capazes de monitorar, em tempo real, as condições dos alimentos tem se destacado como uma alternativa promissora para aumentar a segurança alimentar e minimizar desperdícios. Entre essas tecnologias, os filmes inteligentes indicadores de pH apresentam potencial significativo por permitirem a detecção visual de alterações associadas à deterioração dos alimentos. As antocianinas, pigmentos naturais pertencentes à classe dos flavonoides, destacam-se como indicadores colorimétricos devido à sua elevada sensibilidade às variações de pH, além de apresentarem propriedades antioxidantes e antimicrobianas. A batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* L.) constitui uma importante fonte desses compostos, especialmente por apresentar antocianinas aciladas com maior estabilidade térmica e luminosa. Associadas a matrizes poliméricas biodegradáveis, as antocianinas podem ser utilizadas na produção de filmes inteligentes capazes de monitorar alterações de qualidade em alimentos perecíveis. A revisão da literatura demonstra que filmes elaborados com antocianinas de batata-doce de polpa roxa apresentam respostas colorimétricas eficientes frente às mudanças de pH decorrentes dos processos de deterioração alimentar. Estudos realizados com carnes, pescados, camarões, cogumelos e produtos lácteos evidenciam a capacidade desses sistemas em indicar alterações relacionadas ao crescimento microbiano e à produção de metabólitos de deterioração. Dessa forma, os filmes inteligentes biodegradáveis à base de antocianinas representam uma alternativa sustentável, de baixo custo e fácil interpretação para o monitoramento da qualidade de alimentos, com potencial aplicação na cadeia produtiva do leite bovino e caprino.

Palavras-chave: Leite bovino e caprino; Embalagens inteligentes; Antocianinas; Batata-doce de polpa roxa; Indicadores de pH.

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva dos leites bovino e caprino e seus derivados é de grande importância econômica e social para o Brasil. Atualmente, o Brasil ocupa o terceiro lugar no ranking mundial de produção de leite bovino, com mais de 34 bilhões de litros produzidos anualmente, provenientes, em sua maioria, de pequenas e médias propriedades distribuídas por todos os municípios brasileiros, empregando aproximadamente 4 milhões de pessoas (MAPA, 2025). Em relação ao leite caprino, a produção nacional é de cerca de 25,3 milhões de litros por ano (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2018), sendo 83% dos estabelecimentos localizados na região Nordeste (Carvalho, 2019).

As condições edafoclimáticas do Brasil favorecem o desenvolvimento da cadeia produtiva de leite bovino e caprino em todo o território nacional, permitindo sua adaptação às diferentes características regionais. Segundo o último Censo Agropecuário realizado pelo IBGE, o país possui aproximadamente 1,8 milhão de propriedades leiteiras bovinas, estando essa atividade presente em cerca de 40% das propriedades rurais brasileiras (EMBRAPA, 2021). Em relação à caprinocultura leiteira, existem aproximadamente 16 mil propriedades produtoras, das quais cerca de 66,5% destinam sua produção ao consumo próprio ou familiar (IBGE, 2018; Carvalho, 2019).

No entanto, perdas significativas ainda ocorrem ao longo de toda a cadeia produtiva, tornando necessária a adoção de estratégias capazes de reduzir esses desperdícios, tanto sob o ponto de vista econômico quanto ambiental (Washaya *et al.*, 2022). A redução dessas perdas contribui diretamente para a preservação dos recursos naturais e para a diminuição das emissões de dióxido de carbono, uma vez que o descarte inadequado do leite apresenta elevado potencial poluidor (Silva; Siqueira; Nogueira, 2018; Rasmussen *et al.*, 2024). Além disso, a qualidade do leite é determinada por parâmetros de composição química, características físico-químicas, microbiológicas e condições de higiene (EMBRAPA, 2021), devendo atender aos padrões estabelecidos pela legislação vigente (Zanela, 2006).

Outro aspecto importante relacionado à qualidade do leite é a sanidade do rebanho. A mastite é uma inflamação da glândula mamária causada, principalmente, por infecções bacterianas, promovendo alterações físico-químicas na composição do leite e aumento da contagem de células somáticas, sendo uma das principais enfermidades que acometem bovinos e caprinos leiteiros (Rosa, 2017).

Além da influência de fatores sanitários, como a mastite, o leite é um alimento altamente perecível devido à sua elevada concentração de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento de microrganismos e acelerando sua deterioração. Dessa forma, cuidados adequados devem ser

adotados desde a ordenha até o processamento térmico, visando garantir a segurança do produto para o consumo (Khodabakhsh *et al.*, 2025). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), aproximadamente 600 milhões de pessoas adoecem anualmente em decorrência do consumo de alimentos contaminados, resultando em cerca de 420 mil mortes por ano (OMS, 2024).

Diante desse cenário, torna-se importante o desenvolvimento de tecnologias capazes de monitorar a qualidade dos alimentos durante o armazenamento e a distribuição. Esses dispositivos permitem acompanhar alterações relacionadas ao frescor e ao estado de conservação dos produtos em tempo real, contribuindo para a redução de perdas ao longo da cadeia produtiva e para o aumento da segurança dos alimentos (Silva, 2023). Sua aplicação é especialmente relevante em alimentos altamente perecíveis, como o leite, cuja rápida deterioração reforça a necessidade de métodos simples, rápidos e confiáveis para o monitoramento da qualidade (Weston *et al.*, 2020; Khodabakhsh *et al.*, 2025).

Entre as diferentes tecnologias disponíveis, destacam-se os indicadores colorimétricos de pH, capazes de sinalizar visualmente alterações na acidez ou alcalinidade do meio por meio da mudança de cor (Cho *et al.*, 2022). Essa característica permite acompanhar alterações relacionadas ao processo de deterioração dos alimentos de forma rápida e de fácil interpretação. Para essa aplicação, os indicadores devem apresentar segurança de uso, baixo custo, boa resposta às variações de pH e permitir a visualização das mudanças de cor sem a necessidade de equipamentos adicionais.

Nesse contexto, as antocianinas destacam-se como uma das principais alternativas para utilização em indicadores naturais de pH. Esses pigmentos são responsáveis pelas colorações vermelha, roxa e azul de diversos vegetais, além de serem solúveis em água, atóxicos e apresentarem propriedades antioxidantes e antimicrobianas, características que ampliam seu potencial de aplicação em embalagens inteligentes (Rakić *et al.*, 2019; Roy; Rhim, 2021; Yin *et al.*, 2023).

As antocianinas podem ser obtidas de diferentes fontes vegetais, como amora, mirtilo, uva, jabuticaba e repolho roxo. Entretanto, a batata-doce de polpa roxa destaca-se por apresentar elevado teor de antocianinas na forma acilada, conferindo maior estabilidade frente à luz e à temperatura quando comparada a outras fontes naturais (Becerril *et al.*, 2021).

A batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) foi escolhida como matéria-prima deste estudo devido à sua produção no município de Seropédica, RJ, onde seu cultivo é realizado, principalmente, por pequenos produtores e agricultores familiares, contribuindo para a geração de renda local. Além disso, Seropédica destaca-se como o maior produtor de leite bovino da Baixada Fluminense, tornando relevante o desenvolvimento de tecnologias capazes

de monitorar a qualidade e a segurança do leite e de seus derivados, agregando valor tanto à cadeia produtiva da batata-doce quanto à produção leiteira da região.

1.1 Parâmetros de qualidade do leite bovino

O leite bovino é um produto de origem animal no qual possui uma composição rica em proteínas, vitaminas e gorduras, sendo um dos alimentos mais consumidos pela população, devido a sua composição nutricional e características físico-químicas (Strassburguer *et al.*, 2019). Por definição o leite é um produto oriundo da ordenha completa e ininterrupta, em condições de higiene, vacas saudáveis, bem alimentadas e descansadas segundo o Decreto nº9.013 (BRASIL, 2017).

Em média, o leite de vaca possui 87% de água e os 13% restantes divididos entre: 4 a 5% de carboidratos, 3 a 7% de lipídios - principalmente saturados, 3% de proteínas, 0,8% de minerais e 0,1% vitaminas (Nogara *et al.*, 2022). Contendo nutrientes importantes como gordura, lactose, proteína e minerais, destacando cálcio, fósforo e vitaminas que compõem o conjunto de sólidos do leite (Zanela, 2017).

Os parâmetros de qualidade do leite bovino estão dispostos no Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade (RTIQ), Instrução Normativa nº76 (BRASIL, 2018), devendo atender aos parâmetros sensoriais característicos, como líquido branco opalescente homogêneo e com odor característico e parâmetros de baixa contagem de bactérias, ausência de microrganismos patogênicos, baixa contagem de células somáticas (CCS), livre de adulterantes. Além dos parâmetros sensoriais, o leite deve atender os parâmetros químicos contidos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de qualidade do leite de vaca cru, segundo a Instrução Normativa Nº 76, de 26 de novembro de 2018 (MAPA).

Parâmetro de qualidade	Valores
Teor de gordura (%)	> 3,0
Teor de proteína total (%)	≥ 2,9
Teor de lactose (%)	≥ 4,3
Teor de sólidos não gordurosos (%)	≥ 8,4
Teor de sólidos totais (%)	≥ 11,4
Acidez titulável (% de ácido láctico)	0,14 a 0,18
Estabilidade ao alizarol (%)	≥ 72
Densidade relativa a 15/15 °C (g/mL)	1,028 – 1,034

Índice crioscópico (°C)	-0,512 a -0,536
Contagem padrão em placas (UFC/mL)	≤ 300.000
Contagem de células somáticas (CS/mL)	≤ 500.000

1.2 Parâmetros de qualidade do leite caprino

A caprinocultura leiteira tem grande importância no aumento de renda de pequenos produtores, principalmente na região Nordeste do Brasil, se mostrando uma atividade com crescimento promissor (Costa Ramos Neto, 2021). Assim como o leite bovino, o leite caprino é um alimento rico em proteínas, vitaminas, gorduras e sais minerais. De acordo com a Instrução Normativa Nº 37 de 2000, o leite de cabra é o produto oriundo da ordenha completa, ininterrupta, em condições de higiene, de animais da espécie caprina sadios, bem alimentados e descansados.

A qualidade do leite é determinada por seus parâmetros físico-químicos e microbiológicos. A presença de componentes como proteínas, gordura, lactose, minerais e vitaminas é essencial para a preservação das propriedades do leite. Esses elementos, por sua vez, são influenciados por fatores como a saúde do úbere da fêmea, a alimentação, o manejo adotado, a genética do animal, o estágio da lactação e situações de estresse (Santos e Fonseca, 2007). Além disso, a contagem de células somáticas (CCS) também é utilizada na análise da qualidade do leite cru, segundo SÁNCHEZ MACÍAS *et al.* (2013).

A contagem de células somáticas (CCS) é um excelente indicativo da presença de mastite subclínica em bovinos. Entretanto, sua aplicação em caprinos ainda é controversa, pois o leite dessa espécie apresenta ampla variação em sua composição, influenciada por fatores genéticos, nutricionais, ambientais e também por características individuais do animal (SANTOS, 1995). De Cremoux *et al.* (1999), mostra que uma cabra em lactação apresenta CCS superior a 1.600.000 células/ml. Já para Zamuner (2009), no leite de cabras livres de infecções intramamárias a contagem varia de 50.000 a 400.000 células/mL. Já no estudo de Dutra *et al.* (2014), mostra que CSS apresenta um valor mínimo de 444.000 células/mL e máximo de 4.712.000 células/mL.

Os parâmetros de qualidade do leite caprino estão dispostos no Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade (RTIQ), Instrução Normativa nº37, de 31 de outubro de 2000 (Brasil, 2000), devendo apresentar características físicas, químicas e microbiológicas específicas, como cor branca opalescente, odor característico, sabor suave e agradável, além de limites para contagem de bactérias e outros microrganismos.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade do leite de cabra cru, segundo a Instrução Normativa N° 37, de 31 de outubro de 2000 (MAPA).

Parâmetro de qualidade	Valores
Teor de gordura (%)	> 2,9
Teor de proteína total (%)	≥ 2,8
Teor de lactose (%)	≥ 4,3
Teor de sólidos não gordurosos (%)	≥ 8,2
Teor de cinzas (%)	≥ 0,7
Acidez titulável (% de ácido láctico)	0,13 a 0,18
Densidade relativa a 15/15 °C (g/mL)	1,028 – 1,034
Índice crioscópico (°H)	-0,550 a -0,585
Contagem padrão em placas (UFC/mL)	≤ 500.000

Com o avanço das tecnologias na indústria de laticínios, têm surgido métodos cada vez mais eficientes para monitorar a qualidade do leite em tempo real. É possível acompanhar parâmetros importantes por meio de sensores físico-químicos, eletroquímicos, biossensores e filmes inteligentes. Esses dispositivos permitem identificar rapidamente alterações como variações de pH, presença de gases liberados durante a deterioração, mudanças na umidade e até o histórico de temperatura ao qual o leite foi exposto. Entre eles, os filmes inteligentes têm se destacado por oferecerem uma forma simples, biodegradável, natural e visual de avaliar o frescor do produto. Essa praticidade torna esses sistemas promissores tanto para produtores quanto para consumidores.

1.3 Filmes inteligentes

Entre as tecnologias desenvolvidas para aumentar a vida útil e monitorar a qualidade dos alimentos, destacam-se as embalagens inteligentes. Diferentemente das embalagens convencionais, que têm como principal função proteger o alimento contra danos físicos, químicos e microbiológicos, as embalagens inteligentes são capazes de monitorar alterações ocorridas durante o armazenamento e a distribuição, fornecendo informações sobre o estado de conservação do produto em tempo real (Priyadarshi; Ezati; Rhim, 2021; Shuang, 2025).

Esses sistemas utilizam sensores ou indicadores capazes de responder a alterações físicas, químicas ou biológicas ocorridas no alimento ou no ambiente em que ele se encontra armazenado. Dessa forma, podem monitorar parâmetros como temperatura, umidade,

composição gasosa e pH, fornecendo respostas visuais ou mensuráveis que permitem acompanhar a qualidade do produto ao longo da cadeia produtiva (Hernández-Muñoz, 2019). Essa característica representa uma vantagem em relação às datas de validade convencionais, que são estabelecidas considerando condições ideais de armazenamento e não refletem, necessariamente, as condições reais às quais o alimento foi submetido. Os principais componentes de uma embalagem inteligente estão apresentados na Figura 1.

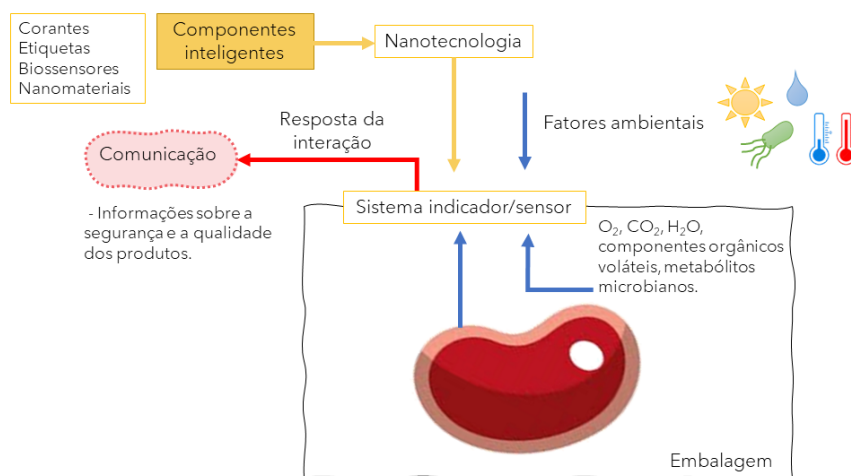


Figura 1. Diagrama esquemático mostrando o conceito de embalagem inteligente.

Fonte: Adaptado de LAURIA & NICOLINI, 2021.

As embalagens inteligentes podem ser classificadas de acordo com o tipo de sensor ou indicador incorporado e o parâmetro monitorado. Entre os principais dispositivos utilizados destacam-se os sensores de umidade, sensores de gases, sensores eletroquímicos, indicadores de tempo-temperatura e indicadores colorimétricos de pH, conforme apresentado na Tabela 3. Cada sistema apresenta uma aplicação específica, permitindo monitorar alterações relacionadas ao armazenamento, à deterioração e ao frescor dos alimentos.

Tabela 3. Tipos de Embalagens Inteligentes, Sensores e Parâmetros Monitorados

Tipo de Embalagem Inteligente	Sensor/Indicador Principal	Parâmetros
Sensores de Umidade	Nanopartículas de Cu	Umidade
Sensores de Gases	SnO ₂ , TiO ₂ , Prata, Ouro	Aminas, H ₂ S (deterioração)
Indicadores de pH (Colorimétricos)	Antocianinas (amora, batata roxa, flor azul, etc.)	Alterações de pH (frescor)

Sensores Eletroquímicos	Grafeno, polianilina, nanofibras de carbono	Nitrito, ácido cítrico
Indicadores de Tempo-Temperatura (TTI)	PVA + nanocristais metálicos (Prata e Ouro)	Histórico térmico
* LUECHINGER, et al., 2007; LI et al., 2017; ZHANG et al., 2013, ZHAI et al., 2019		

Dentre as diferentes tecnologias disponíveis, os filmes indicadores de pH têm recebido destaque devido à facilidade de aplicação, rápida resposta às alterações do alimento e interpretação visual pelos consumidores (Li *et al.*, 2023). Esses filmes são constituídos por uma matriz polimérica incorporada a um indicador sensível às variações de pH, permitindo a mudança de cor conforme ocorrem alterações relacionadas ao processo de deterioração dos alimentos.

Os indicadores utilizados nesses sistemas podem ser classificados de acordo com sua origem em sintéticos ou naturais. Os indicadores sintéticos são obtidos por processos químicos industriais, enquanto os naturais são extraídos de diferentes fontes vegetais ricas em pigmentos sensíveis ao pH, como as antocianinas presentes na batata-doce de polpa roxa. A Tabela 4 apresenta os principais polímeros, fontes de antocianinas e processos tecnológicos empregados na produção desses filmes.

Nos últimos anos, observa-se um aumento no desenvolvimento de filmes biodegradáveis utilizando pigmentos naturais associados a matrizes poliméricas, buscando aliar o monitoramento da qualidade dos alimentos à redução dos impactos ambientais (Cheng *et al.*, 2022). Além disso, diferentes estratégias têm sido estudadas para aumentar a estabilidade desses materiais. J. Li *et al.* (2024), por exemplo, demonstraram que a incorporação de nanopartículas aumentou a estabilidade de filmes contendo antocianinas, mantendo sua resposta colorimétrica mesmo após 30 dias de exposição à luz e a temperaturas elevadas.

Tabela 4. Polímero, fonte de antocianina, concentração e solvente da solução extratora, teor de antocianina do extrato, fonte de antocianina e quantidade de pigmento adicionado.

Polímero	Fonte de antocianina	Processo tecnológico de obtenção de antocianina	Teor de antocianina	Quantidade de pigmento adicionado	Referência
Amido e polivinilálcool (PVA)	Batata-doce em pó (comercial)	1. Extração com etanol 70% (20% p/v) 2. Concentração	4,20 mg/g	0; 0,5; 1 g/100 mL de solução formadora de filme	(Zhang <i>et al.</i> , 2020)

Amido e polivinilálcool (PVA)	Batata-doce em pó (in natura)	1. Extração com solução etanólica acidificada (5% p/v; ácido acético 1,0 mol/L) 2. Concentração 3. Diluição em etanol acidificado	-	4% (v/v) em relação à solução formadora de filme	(Chen, H. <i>et al.</i> , 2020)
Amido de batata + casca de batata (pó)	Antocianina comercial	-	5,29 mg/g	0; 1; 1,5; 2% (m/v)	(Sohany <i>et al.</i> , 2021)
Amido e gelatina	Batata-doce em pó (in natura)	1. Desidratação da batata-doce fatiada 2. Preparação de pó 3. Extração com etanol/ácido cítrico (2,5% p/v) 4. Concentração	208,55 mg/L	3; 6; 12 mg de extrato/100 mg de amido	(Niu <i>et al.</i> , 2021)
Amido e gelatina	Antocianina comercial de batata-doce	-	-	0,1 g/100 mL	(Zong <i>et al.</i> , 2023)
Amido e/ou carboximetilcelulose	Batata-doce cozida	-	60,28 mg/100 g	0; 2; 3 g/100 mL de solução filmogênica	(Silva <i>et al.</i> , 2023)
Ágar + alginato de sódio + quitosana carregada com nanopartículas de quercetina	Batata-doce em pó (comercial)	1. Extração com etanol 70% (10% p/v) 2. Concentração 3. Purificação	11,66 mg/g	1,5% em peso na solução formadora de filme	(Dong <i>et al.</i> , 2023)
Agarose	Batata-doce (in natura)	1. Extração com etanol acidificado (50% etanol + 1% HCl) 2. Concentração	14,8 mg/100 g de extrato	1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0% em relação à massa de agarose	(Huang <i>et al.</i> , 2021)
Alginato de sódio	Casca de batata-doce (pó)	1. Desidratação da casca 2. Preparação de pó 3. Extração com etanol 80% (5% p/v) 4. Concentração	513 mg/100 g de extrato	0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0% (p/v)	(Zhao <i>et al.</i> , 2022)
Etilcelulose	Batata-doce	1. Extração com	28,2 mg/g	2 g em 7 mL	(Wang <i>et al.</i> ,

	em pó (comercial)	etanol absoluto (6,7%) 2. Concentração		de solução formadora de filme	2022)
Exopolissacarídeo rícina e PVA	Batata-doce em pó (comercial)	1. Extração com etanol 40% (10% p/v) 2. Concentração	5,74 mg/g	200; 300; 400 mg/100 mL de solução formadora de filme	(Miao <i>et al.</i> , 2023)
Glicerina e alginato de sódio	Batata-doce cozida	-	300–400 mg/100 g	6,8 g em 85 mL de água (com adição de alginato e glicerina)	(Li <i>et al.</i> , 2023)
Goma de alfarroba / PVA; quitosana / PVA; κ-carragenina / PVA	Batata-doce (in natura)	1. Extração com etanol 80% acidificado (10% p/v; 1% HCl) 2. Concentração 3. Purificação	87,79 mg/g	1% em peso de PVA	(Yong <i>et al.</i> , 2022)
Pululano + extrato de batata-doce / zeína- glicerol-carvacrol (ZN-GL-CA)	Batata-doce em pó (comercial)	1. Extração com etanol 80% (7% p/v) 2. Concentração	-	0; 20; 30; 40% em relação à massa de pululano	(Guo <i>et al.</i> , 2020)
Quitosana / PVA / nano-ZnO	Batata-doce em pó (comercial)	1. Extração com etanol 50% (10% p/v) 2. Concentração	8,2 mg/g	0; 120; 180; 240 mg/g (base seca de quitosana + PVA)	(Liu, J. <i>et al.</i> , 2021)
κ-carragenina	Batata-doce (in natura)	1. Extração com etanol acidificado (5% p/v; 0,1% HCl) 2. Concentração	-	3 mg/mL de mistura de antocianinas e betacianinas (proporções variadas)	(Gao <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Adaptado de Silva (2023)

1.4 Utilização de antocianinas de batata doce de polpa roxa em filmes inteligentes

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) é uma cultura agrícola de grande importância econômica, amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais (Ji *et al.*, 2021). Sua produção caracteriza-se pela baixa exigência quanto à fertilidade do solo (Minemba *et al.*, 2019; Fernandes *et al.*, 2024), elevado rendimento, reduzida demanda de recursos, ciclo curto e boa adaptação às diferentes condições climáticas, além de apresentar tolerância à seca (Saoakhova *et al.*, 2024). Atualmente, essa cultura possui papel estratégico para a segurança

alimentar em diversos países da África Subsaariana, América Latina e Ásia, sendo o Brasil o maior produtor da América do Sul (FAOSTAT, 2023; Fernandes *et al.*, 2024).

Dentre as diferentes variedades de batata-doce, destaca-se a batata-doce de polpa roxa, reconhecida pelo seu elevado valor nutricional e pela presença de compostos bioativos de interesse para a indústria de alimentos. Sua composição é caracterizada pela elevada concentração de carboidratos, fibras, minerais, aminoácidos, vitaminas e compostos fenólicos, destacando-se as antocianinas, além de β -caroteno e ácido ascórbico (Hernández-Santos *et al.*, 2023; Meng *et al.*, 2023).



Figura 2. Batata doce de polpa roxa

Fonte: Da Cunha Júnior *et al.*, 2023.

A composição química da batata-doce de polpa roxa pode variar em função da cultivar, das condições de cultivo, do estágio de maturação e do processamento aplicado após a colheita (Hernández-Santos *et al.*, 2023). Além dos macronutrientes, esse tubérculo apresenta elevada concentração de compostos bioativos, incluindo compostos fenólicos, flavonoides, carotenoides e ácidos fenólicos, que contribuem para seu valor nutricional e para suas propriedades biológicas (Ivane *et al.*, 2024; Meng *et al.*, 2023). O processamento também exerce influência sobre a disponibilidade desses compostos. Tratamentos térmicos, como o cozimento, promovem o rompimento da parede celular e facilitam a liberação de compostos antioxidantes, especialmente as antocianinas, aumentando sua disponibilidade para extração (Chen *et al.*, 2024).

Dentre os compostos bioativos presentes na batata-doce de polpa roxa, as antocianinas destacam-se por serem os principais pigmentos responsáveis pela coloração característica desse tubérculo. Esses compostos pertencem à classe dos flavonoides e apresentam elevada sensibilidade às variações de pH, característica que tem despertado interesse para sua aplicação

em alimentos e embalagens inteligentes. Além disso, as antocianinas da batata-doce de polpa roxa ocorrem predominantemente na forma acilada, conferindo maior estabilidade frente à temperatura, à luz e ao armazenamento quando comparadas às antocianinas não aciladas (Hernández-Santos *et al.*, 2023; Gençdağ *et al.*, 2024).

Para que as antocianinas possam ser utilizadas como indicadores colorimétricos em embalagens inteligentes, é necessária sua incorporação em uma matriz polimérica capaz de formar filmes. A escolha desse material é fundamental, pois influencia diretamente as propriedades físicas, mecânicas e a estabilidade do dispositivo, além de proteger o pigmento contra fatores ambientais que podem comprometer sua funcionalidade (Gençdağ *et al.*, 2024; Becerril, Nerín e Silva, 2021). Dessa forma, o desenvolvimento de matrizes biodegradáveis associadas a pigmentos naturais tem despertado crescente interesse, principalmente devido à busca por materiais mais sustentáveis para aplicação em embalagens alimentícias.

Os materiais poliméricos utilizados na produção de embalagens alimentícias são, em sua maioria, obtidos de fontes não renováveis, contribuindo para o aumento da geração de resíduos plásticos e dos impactos ambientais associados ao seu descarte (González-López *et al.*, 2023; Jafarzadeh *et al.*, 2023). Considerando que os filmes indicadores de pH são, em geral, dispositivos de uso único, o desenvolvimento de matrizes biodegradáveis associadas a pigmentos naturais representa uma alternativa para reduzir os impactos ambientais decorrentes de sua utilização e atender à crescente demanda por embalagens mais sustentáveis (Alizadeh-Sani *et al.*, 2020).

Em comparação aos polímeros sintéticos, os biopolímeros têm recebido crescente atenção para aplicação em embalagens alimentícias devido à sua biodegradabilidade, biocompatibilidade, baixa toxicidade e por serem obtidos, em sua maioria, de fontes renováveis (Kumar *et al.*, 2022; Jafarzadeh *et al.*, 2023). Entretanto, esses materiais apresentam limitações que podem comprometer sua aplicação, como baixa resistência mecânica, elevada permeabilidade ao vapor de água e aos gases, além de elevada hidrofiliabilidade (Roy; Rhim, 2021; González-López *et al.*, 2023). Dessa forma, diferentes estratégias têm sido empregadas para melhorar as propriedades desses filmes, incluindo a combinação de biopolímeros, a incorporação de nanopartículas, a produção de filmes multicamadas e a adição de plastificantes, como glicerol, visando aumentar a resistência mecânica, a flexibilidade e a estabilidade dos materiais (Dong *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2023a).

A matriz polimérica exerce influência direta nas propriedades físicas, mecânicas e na resposta colorimétrica dos filmes indicadores de pH (Yong *et al.*, 2022). Dessa forma, sua escolha é uma etapa importante durante o desenvolvimento de embalagens inteligentes. Para a

incorporação de indicadores de pH, a matriz polimérica deve apresentar boa capacidade de formação de filme, baixa toxicidade, resistência mecânica adequada e estabilidade durante o armazenamento. Além disso, deve permitir a difusão da umidade, condição necessária para que ocorram as alterações de cor do indicador (Becerril; Nerín; Silva, 2021).

O amido é um dos biopolímeros mais utilizados na produção de filmes biodegradáveis devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, biodegradabilidade e boa capacidade de formação de filmes (Deng *et al.*, 2024; Pei *et al.*, 2024). Além disso, apresenta boa barreira ao oxigênio e elevada transparência, características que favorecem sua aplicação em embalagens alimentícias. Entretanto, os filmes produzidos exclusivamente com amido apresentam limitações, como baixa resistência mecânica e elevada sensibilidade à umidade, o que pode comprometer sua aplicação. Dessa forma, a associação do amido com outros polímeros, como carboximetilcelulose, álcool polivinílico (PVA), gelatina e ágar, tem sido amplamente utilizada para melhorar as propriedades físico-mecânicas e de barreira dos filmes, ampliando sua aplicação em embalagens inteligentes (Deng *et al.*, 2024; Pei *et al.*, 2024; Mishra *et al.*, 2024).

O álcool polivinílico (PVA) também é amplamente utilizado na produção de filmes biodegradáveis devido à sua elevada capacidade de formação de filmes, flexibilidade e boa barreira aos gases (Deng *et al.*, 2024). Além disso, por apresentar caráter hidrofílico, o PVA favorece a incorporação de compostos hidrossolúveis, como as antocianinas, contribuindo para a estabilidade e a resposta colorimétrica dos filmes (Becerril; Nerín; Silva, 2021).

As antocianinas de batata-doce de polpa roxa vêm sendo amplamente utilizadas no desenvolvimento de filmes indicadores de pH devido à elevada sensibilidade às variações de pH e à maior estabilidade proporcionada pela presença predominante de antocianinas aciladas (Gençdağ *et al.*, 2024; Becerril; Nerín; Silva, 2021). Diferentes matrizes poliméricas têm sido empregadas para a incorporação desses pigmentos, demonstrando o potencial da batata-doce de polpa roxa como fonte de indicadores naturais para embalagens inteligentes.

Diferentes matrizes poliméricas têm sido utilizadas para a incorporação de antocianinas de batata-doce de polpa roxa na produção de filmes indicadores de pH. Entre as principais matrizes empregadas destacam-se amido, carboximetilcelulose (CMC), álcool polivinílico (PVA), quitosana, κ -carragenina e outros polissacarídeos naturais, demonstrando que a escolha da matriz influencia diretamente as propriedades físico-mecânicas e a resposta colorimétrica dos filmes (Jiang *et al.*, 2020; Yong *et al.*, 2022; Miao *et al.*, 2023; Ke *et al.*, 2024). As principais características desses estudos estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Principais estudos sobre o desenvolvimento de filmes indicadores de pH utilizando

antocianinas de batata-doce de polpa roxa

Referência	Matriz polimérica	Matéria-prima	Aplicação
Jiang <i>et al.</i> (2020)	Amido + CMC	Batata in natura	Camarão
Yong <i>et al.</i> (2022)	Goma de alfarroba/PVA, Quitosana/PVA e κ - carragenina/PVA	Batata in natura	Carne
Miao <i>et al.</i> (2023)	Riclina + PVA	Pó comercial	Peixes
Ke <i>et al.</i> (2024)	PVA + alginato de sódio + CMC	Extrato de batata- doce de polpa roxa	Carne suína e cerejas

Fonte: Adaptado de Jiang *et al.* (2020), Yong *et al.* (2022), Miao *et al.* (2023) e Ke *et al.* (2024).

1.5 Estratégias para obtenção e utilização de antocianinas de batata-doce de polpa roxa

Diferentes estratégias têm sido utilizadas para obtenção de antocianinas de batata-doce de polpa roxa destinadas à produção de filmes indicadores de pH. Entre elas destacam-se o uso de extratos obtidos a partir da batata-doce in natura, extratos comerciais, pós comerciais e, mais recentemente, a utilização direta do pó produzido a partir da batata-doce submetida a tratamento térmico e liofilização, dispensando a etapa de extração das antocianinas (Sohany *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2023a).

A utilização direta do pó de batata-doce representa uma alternativa ao processo convencional de extração, reduzindo o número de etapas de processamento e possibilitando o aproveitamento integral do material vegetal. Nesse método, a batata-doce é submetida ao tratamento térmico, seguida de liofilização e moagem para obtenção do pó, que é incorporado diretamente à matriz filmogênica. Filmes produzidos por essa metodologia apresentaram elevada sensibilidade às alterações de pH e eficiência no monitoramento da deterioração de carne moída (Silva *et al.*, 2023a) e camarão (Li *et al.*, 2023).

A obtenção das antocianinas de batata-doce de polpa roxa é realizada, principalmente, por meio de extração com solventes hidroalcoólicos, utilizando etanol em diferentes concentrações, acidificado ou não, seguida por processos de concentração e secagem (Gençdağ *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2024). Como fonte das antocianinas podem ser utilizadas batatas-doces frescas, cascas, extratos e pós obtidos comercialmente ou produzidos em laboratório a partir de

diferentes técnicas de secagem, como a liofilização (Huang *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022).

O pó de batata-doce de polpa roxa tem sido uma das formas mais utilizadas para obtenção de antocianinas devido à facilidade de armazenamento, maior estabilidade dos compostos bioativos e facilidade de incorporação às matrizes poliméricas. Esse material pode ser obtido comercialmente ou produzido em laboratório por meio de diferentes processos de secagem, sendo a liofilização uma das técnicas mais empregadas por preservar compostos sensíveis ao calor, como as antocianinas (Gençdağ *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023a).

As propriedades dos filmes indicadores de pH são influenciadas por diferentes fatores, como a fonte das antocianinas, o método de extração, a matriz polimérica e a concentração do pigmento incorporado ao filme (Yong *et al.*, 2022). Além disso, fatores externos, como temperatura e umidade, também podem interferir na resposta colorimétrica dos filmes (Huang *et al.*, 2021). Entre esses fatores, a concentração de antocianinas exerce maior influência sobre o desempenho do indicador, uma vez que concentrações reduzidas podem dificultar a visualização da mudança de cor, enquanto concentrações elevadas podem aumentar o tempo de resposta e comprometer a diferenciação das cores (Becerril; Nerín; Silva, 2021)

A concentração de antocianinas incorporada à matriz polimérica também influencia as propriedades dos filmes indicadores de pH. O aumento da concentração do pigmento promove maior intensidade da coloração, porém pode alterar as propriedades físico-mecânicas e a resposta colorimétrica do filme. Em concentrações intermediárias, os filmes apresentam melhor desempenho na detecção de compostos relacionados à deterioração dos alimentos, enquanto concentrações elevadas podem aumentar o tempo de resposta e reduzir a diferenciação das cores (Liu, J. *et al.*, 2021; Niu *et al.*, 2021).

Além da resposta colorimétrica, a concentração de antocianinas também influencia as propriedades mecânicas e de barreira dos filmes. O aumento do teor de pigmento pode reduzir a resistência à tração, o alongamento na ruptura e a barreira ao vapor de água. Por outro lado, promove melhorias na barreira à radiação UV-Vis, na estabilidade térmica, na atividade antioxidante e na sensibilidade às variações de pH (Yong *et al.*, 2022).

A influência da concentração de antocianinas também foi observada em filmes produzidos com amido e carboximetilcelulose (CMC). Jiang *et al.* (2020) avaliaram diferentes concentrações de pó de antocianina (0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 g/100 g) e verificaram que o aumento do teor de pigmento favoreceu a interação entre as antocianinas e a matriz polimérica por meio de ligações de hidrogênio, resultando em maior resistência à tração. Entretanto, o aumento da concentração reduziu o alongamento na ruptura devido à maior rigidez da estrutura

formada. Além disso, concentrações mais elevadas promoveram maior variação de cor quando expostas ao vapor de amônia, porém aumentaram o tempo necessário para estabilização da resposta colorimétrica.

1.6 Antocianinas

As antocianinas são compostos fenólicos pertencentes à classe dos flavonoides, caracterizados pela estrutura química básica C6-C3-C6, composta por dois anéis aromáticos e um anel heterocíclico (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010). Esses pigmentos são amplamente distribuídos em frutas, hortaliças, flores e outras fontes vegetais, sendo responsáveis pelas colorações vermelha, roxa, azul e violeta observadas nesses alimentos. A estrutura química básica das antocianinas está apresentada na Figura 3.

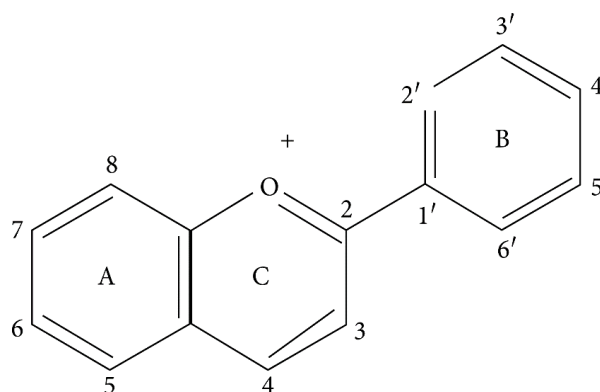


Figura 3. Estrutura química do íon flavílio.

Fonte: AZZINI *et al.* (2017)

Quimicamente, as antocianinas são glicosídeos derivados das antocianidinas, tendo o cátion flavílio como estrutura central. Os açúcares mais frequentemente ligados às antocianidinas são glicose, galactose, ramnose, arabinose e xilose, contribuindo para a diversidade estrutural desses pigmentos. Além disso, essas moléculas podem apresentar diferentes graus de acilação, característica que influencia diretamente sua estabilidade frente à temperatura, à luz e às variações de pH (He *et al.*, 2024; Gençdağ *et al.*, 2024).

Atualmente, são conhecidas mais de 20 antocianidinas, que se diferenciam pelo número e pela posição dos grupos hidroxila e metoxila presentes em sua estrutura química. Entretanto, apenas seis são predominantes nas plantas vasculares: pelargonidina, cianidina, delphinidina, peonidina, petunidina e malvidina (Becerril; Nerín; Silva, 2021; He *et al.*, 2024). A combinação dessas antocianidinas com diferentes açúcares e grupos acilantes resulta em uma grande diversidade estrutural, sendo descritas mais de 600 antocianinas na natureza (Gençdağ *et al.*, 2022). As principais antocianidinas e suas respectivas colorações estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Propriedades químicas de antocianidinas selecionadas e suas principais propriedades de cor.

Antocianidina	R^{3'}	R^{4'}	R^{5'}	R³	R⁵	R⁶	R⁷	Cor Principal
Apigeninidina	-H	- OH	-H	-H	-OH	-H	-OH	Vermelho
Aurantidinina	-H	- OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH	Vermelho
Cianidina	-OH	- OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH	Roxo- avermelhado
Delfinidina	-OH	- OH	-OH	-OH	-OH	-H	-OH	Azul e Azul- avermelhado
Europinidina	- OCH ₃	- OH	-OH	-OH	-OCH ₃	-H	-OH	Vermelho- azulado
Malvidina	- OCH ₃	- OH	- OCH ₃	-OH	-OH	-H	-OH	Vermelho e Azul
Pelargonidina	-H	- OH	-H	-H	-OH	-H	-OH	Laranja
Peonidina	- OCH ₃	- OH	-H	-OH	-OH	-H	-OH	Vermelho- arroxeado
Petunidina	-OH	- OH	- OCH ₃	-OH	-OH	-H	-OH	Vermelho escuro e Roxo
Rosinidina	- OCH ₃	- OH	-H	-OH	-OH	-H	- OCH ₃	Vermelho

Referência: Adaptado de E. Gençdağ *et al.* 2022.

A estabilidade estrutural das antocianinas é influenciada por diversos fatores ambientais, como pH, temperatura, presença de enzimas, exposição à radiação ultravioleta, oxigênio e copigmentação (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; Roy; Rhim, 2021). Entre esses fatores, o pH exerce maior influência sobre a estrutura química e, conseqüentemente, sobre a coloração das antocianinas. Em meio aquoso, esses pigmentos podem assumir diferentes formas estruturais de acordo com a variação do pH. Em valores de pH entre 1 e 3, predomina o cátion flavílio, responsável pela coloração vermelha e pela maior estabilidade da molécula. Entre pH 4 e 5 ocorre a formação da pseudobase carbinol, resultando na perda da coloração. Em pH entre

6 e 7 predomina a base quinoidal, responsável pela coloração azulada. Já em pH acima de 7 ocorre a formação da chalcona, também incolor (Azzini; Giacometti; Russo, 2017; Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; Xue *et al.*, 2024).

Além do pH, a estabilidade das antocianinas também é influenciada pela sua estrutura química, especialmente pelo número de grupos hidroxila e metoxila presentes na molécula. O aumento do número de grupos metoxila favorece a estabilidade do pigmento e está associado a colorações mais avermelhadas. Por outro lado, o aumento do número de grupos hidroxila reduz a estabilidade das antocianinas e favorece colorações mais azuladas (Tarone; Cazarin; Maróstica Junior, 2020).

Apesar da instabilidade frente às variações de pH, temperatura, luz e oxigênio, as antocianinas têm sido amplamente utilizadas como corantes naturais devido à sua elevada disponibilidade, baixa toxicidade e propriedades antioxidantes e antimicrobianas (Becerril; Nerín; Silva, 2021; Yin *et al.*, 2023). Essa característica, que pode representar uma limitação para algumas aplicações industriais, torna-se uma vantagem no desenvolvimento de filmes indicadores de pH, uma vez que a alteração da estrutura química das antocianinas resulta em mudanças visíveis de cor em resposta às condições do meio (Cheng *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2023).

1.7 Aplicação dos Filmes Inteligentes no Monitoramento da Qualidade de Alimentos

Os filmes indicadores de pH têm sido aplicados no monitoramento da qualidade de diferentes alimentos perecíveis, como carnes, pescados, leite e frutos do mar. De modo geral, esses sistemas respondem às alterações químicas decorrentes da deterioração dos alimentos, principalmente às variações de pH e ao aumento de compostos voláteis nitrogenados, permitindo o acompanhamento visual do frescor durante o armazenamento. As principais aplicações descritas na literatura estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Aplicação de filmes indicadores de pH

Alimento	Tipo de aplicação	Condições de armazenamento	Principais resultados	Referência
Leite	Atmosfera interna	25 °C por 48 h	A acidificação bacteriana promoveu redução do pH e mudança de cor do filme de vermelho para roxo. A incorporação de limoneno retardou a deterioração do leite.	Liu <i>et al.</i> (2017)

	Smart label	Temperatura ambiente e refrigeração	Mudança de cor do indicador de roxo para vermelho-arroxeadado durante a deterioração do leite.	Rusdianto & Ramadhan (2021)
Frango	Contato direto	28 ± 2 °C por 24 h	O aumento do pH foi acompanhado pela mudança de cor do filme. Observou-se migração de antocianinas quando o filme permaneceu em contato direto com o alimento.	Sohany <i>et al.</i> (2021)
	Atmosfera interna	4 °C por 5 dias e 25 °C por 60 h	O aumento do pH e do TVB-N foi acompanhado pela mudança de cor do filme de rosa para azul, apresentando forte correlação com o frescor.	Zhao <i>et al.</i> (2022)
Carne moída	Atmosfera interna	4 °C por 10 dias	O aumento do pH e da contagem microbiana foi acompanhado por mudança gradual da cor do filme, permitindo monitorar visualmente a deterioração da carne.	Silva <i>et al.</i> (2023a)
Carne suína	Atmosfera interna	4 °C por 8 dias	O aumento do TVB-N foi acompanhado pela mudança de cor do filme de rosa para azul, indicando perda de frescor.	Wang <i>et al.</i> (2022)
	Atmosfera interna	25 °C por 72 h e 4 °C por 8 dias	O aumento do pH, TVB-N e TBARS foi acompanhado por alterações visíveis na coloração do filme, sendo a deterioração mais rápida em temperatura ambiente.	Gao <i>et al.</i> (2022)
Peixe	Atmosfera interna	25 °C por 48 h	O aumento do pH, TVB-N e da contagem microbiana foi acompanhado pela mudança de cor do filme de rosa para roxo e azul durante o armazenamento.	Jiang <i>et al.</i> (2020)
	Atmosfera interna	4 °C por 10 dias	O aumento do TVB-N e da contagem microbiana foi acompanhado pela mudança de cor do filme. Os filmes contendo antocianina e curcumina apresentaram melhor desempenho no monitoramento do frescor.	Chen, H. <i>et al.</i> (2020)
Camarão	Atmosfera	4 °C por 1 dia e	O aumento do TVB-N, do pH	Dong <i>et al.</i>

interna	25 °C por 3 h	e da carga microbiana foi acompanhado por mudança de cor do filme, permitindo identificar rapidamente a deterioração do alimento.	(2023)
Atmosfera interna	4 °C por 6 dias	O aumento do TVB-N foi acompanhado pela mudança gradual da cor do filme durante o armazenamento refrigerado.	Li <i>et al.</i> (2023)
Atmosfera interna	25 °C por 24 h	O aumento do pH e do TVB-N apresentou forte correlação com a mudança de cor do filme, permitindo o monitoramento visual do frescor.	Miao <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2023).

A maior parte dos estudos sobre filmes indicadores de pH foi realizada em produtos cárneos e pescados, devido à elevada perecibilidade desses alimentos (Silva *et al.*, 2023a). Essa característica está relacionada à alta atividade de água, ao elevado teor de proteínas e outros nutrientes, à presença de enzimas autolíticas e ao crescimento de microrganismos deteriorantes, fatores que favorecem alterações físico-químicas e microbiológicas durante o armazenamento (Khodabakhsh *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2023a). Como consequência, ocorre a formação de diferentes metabólitos que alteram o pH do alimento e podem ser detectados pelos filmes indicadores.

Os compostos produzidos durante a deterioração variam de acordo com a composição do alimento. Em produtos ricos em proteínas, como frango, carne suína, peixes e camarão, predominam compostos nitrogenados voláteis, como amônia e outras aminas, resultantes da degradação proteica (Zhao *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023). Em cogumelos, a deterioração está relacionada, principalmente, ao aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) (Zong *et al.*, 2023). Já nos produtos lácteos, o crescimento de bactérias ácido-láticas promove a produção de ácido lático, reduzindo o pH do alimento e desencadeando a mudança de cor dos filmes indicadores (Liu *et al.*, 2017).

Para avaliar a eficiência dos filmes indicadores de pH, a maioria dos estudos utilizou sistemas modelo capazes de simular a deterioração dos alimentos durante o armazenamento. De modo geral, o alimento foi acondicionado em um recipiente fechado, enquanto o filme indicador permaneceu fixado na superfície interna da embalagem, permitindo o monitoramento das alterações na atmosfera formada durante a deterioração, sem contato direto com o alimento. Esse sistema está ilustrado na Figura 4a e as principais aplicações descritas na literatura estão

apresentadas na Tabela 7.

Além do sistema modelo em placas de Petri, alguns estudos avaliaram a aplicação dos filmes em diferentes materiais de embalagem, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e polietileno tereftalato (PET), aproximando as condições experimentais da aplicação prática em alimentos (Chen, H. *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Yong *et al.*, 2022). Em alguns casos, os filmes também foram aplicados diretamente sobre a superfície do alimento. Entretanto, devido à elevada solubilidade das antocianinas em água, essa abordagem pode favorecer a migração do pigmento para o alimento, limitando sua aplicação (Sohany *et al.*, 2021).

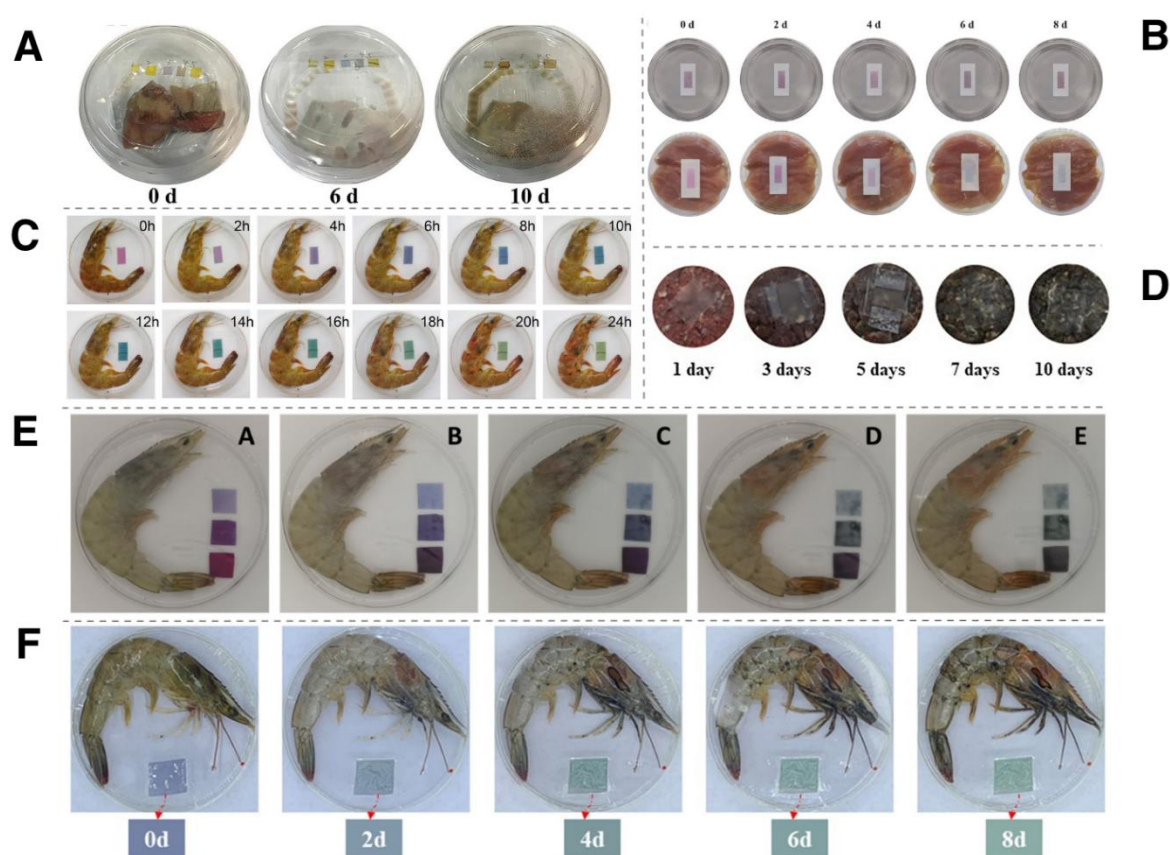


Figura 4: Exemplos de como filmes indicadores de pH podem ser aplicados. (A) [Reproduzido com permissão de (Chen et al., 2020), © Elsevier BV]. (B) [Reproduzido com permissão de (Wang et al., 2022), © Elsevier BV]. (C) [Reproduzido com permissão de (Miao et al., 2023), © Elsevier BV]. (D) [Reproduzido com permissão de (Silva et al., 2023), © Elsevier BV]. (E) [Reproduzido com permissão de (Zhang et al., 2020), © Elsevier BV]. (F) [Reproduzido com permissão de (Liu et al., 2021), © Elsevier BV].

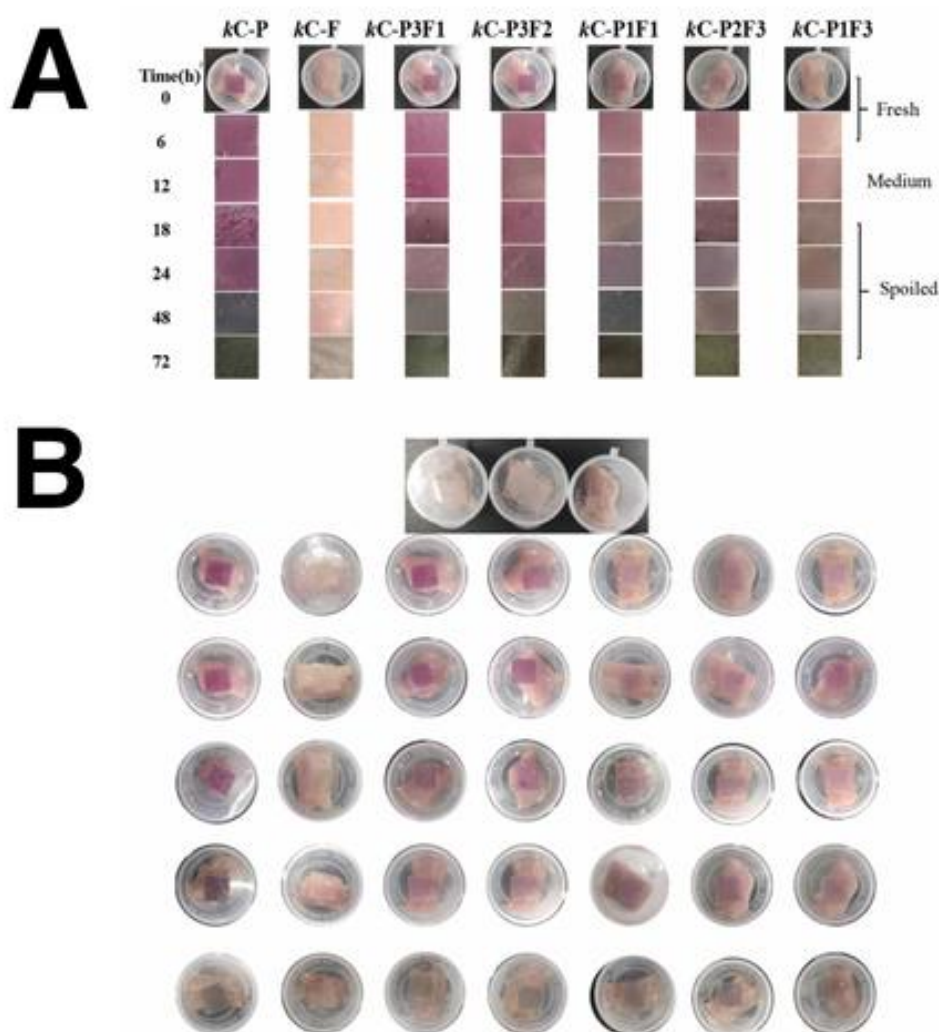


Figura 5. Exemplos de aplicação de filmes indicadores de pH. (A), (B) [reproduzido com permissão de (Gao et al., 2022), © Elsevier BV].

2 CONCLUSÃO

A literatura demonstra que os filmes inteligentes biodegradáveis contendo antocianinas representam uma alternativa promissora para o monitoramento da qualidade de alimentos, permitindo a detecção visual de alterações decorrentes do processo de deterioração. Entre as diferentes fontes de pigmentos naturais, a batata-doce de polpa roxa destaca-se pelo elevado teor de antocianinas aciladas, que apresentam maior estabilidade e elevada sensibilidade às variações de pH, características que favorecem sua aplicação em indicadores colorimétricos. Além disso, o emprego de matrizes biodegradáveis à base de amido e outros biopolímeros possibilita o desenvolvimento de materiais sustentáveis, capazes de aliar funcionalidade, baixo impacto ambiental e potencial aplicação na indústria de alimentos.

Embora avanços significativos tenham sido alcançados nos últimos anos, a maior parte dos

estudos concentra-se na aplicação desses filmes em carnes, pescados e frutos do mar, sendo ainda limitada sua utilização no monitoramento da qualidade de produtos lácteos. Da mesma forma, observa-se um número reduzido de trabalhos que empregam diretamente o pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa, sem a etapa prévia de extração das antocianinas, bem como estudos que avaliem a influência de fatores como granulometria e sonicação sobre as propriedades dos filmes.

Nesse contexto, o desenvolvimento de filmes inteligentes biodegradáveis utilizando pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa para aplicação no monitoramento da qualidade de leites bovino e caprino representa uma estratégia inovadora, reunindo sustentabilidade, aproveitamento de matéria-prima de origem vegetal e potencial aplicação na cadeia produtiva do leite. Dessa forma, o presente trabalho busca contribuir para a ampliação do conhecimento sobre filmes indicadores de pH, bem como para o desenvolvimento de tecnologias capazes de monitorar, de forma simples e visual, a qualidade de produtos lácteos em tempo real.

CAPÍTULO II

Otimização e caracterização de filmes inteligentes biodegradáveis utilizando pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa para monitoramento da qualidade do leite bovino e caprino

CAPÍTULO II: Otimização e caracterização de filmes inteligentes biodegradáveis utilizando pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa para monitoramento da qualidade do leite bovino e caprino

RESUMO

O desenvolvimento de filmes inteligentes biodegradáveis representa uma alternativa promissora para o monitoramento da qualidade de alimentos e para a redução de perdas e desperdícios. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo otimizar e caracterizar filmes inteligentes biodegradáveis incorporados com pó de batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.), visando sua aplicação como indicador colorimétrico de pH para o monitoramento da qualidade de leites bovino e caprino. Inicialmente, foram produzidos pós de batata-doce por liofilização e por liofilização seguida de secagem complementar em estufa, sendo avaliadas suas características físico-químicas, colorimétricas e o teor de antocianinas. O pó obtido exclusivamente por liofilização apresentou maior preservação dos compostos de interesse, com 84,88% de carboidratos, 1,97% de cinzas e 31,20 mg 100 g⁻¹ de antocianinas monoméricas, enquanto a secagem complementar em estufa reduziu esses teores. Além disso, o pó apresentou ampla resposta colorimétrica entre pH 1 e 11, evidenciando o potencial das antocianinas como indicadores naturais de pH. Os filmes foram produzidos utilizando diferentes concentrações de pó, granulometrias e aplicação de sonicação. A incorporação do PLBD promoveu melhorias nas propriedades estruturais dos filmes, sendo que as formulações produzidas com partículas de menor granulometria e submetidas à sonicação apresentaram melhor homogeneidade e manuseabilidade. Os filmes contendo maiores concentrações de PLBD apresentaram coloração mais intensa e maior sensibilidade às variações de pH, com transição de tonalidades rosadas em meio ácido para verdes em meio alcalino. As análises de microscopia eletrônica de varredura evidenciaram maior rugosidade superficial após a incorporação do PLBD, enquanto as análises de FTIR demonstraram que não houve formação de novos grupos funcionais, indicando que as interações entre os componentes ocorreram predominantemente por ligações de hidrogênio. As análises térmicas mostraram que a incorporação do PLBD não comprometeu a estabilidade dos filmes. De modo geral, os filmes desenvolvidos apresentaram estabilidade estrutural, elevada sensibilidade às variações de pH e potencial para aplicação como embalagens inteligentes destinadas ao monitoramento da qualidade de leites bovino e caprino.

Palavras-chave: Batata-doce de polpa roxa; Antocianinas; Filmes inteligentes; Embalagens biodegradáveis; Indicador de pH.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de filmes biodegradáveis capazes de indicar, em tempo real, o frescor, a qualidade e a segurança dos alimentos têm se destacado como uma estratégia promissora para o monitoramento da deterioração de produtos perecíveis. Além de fornecer informações ao consumidor durante o armazenamento, esses sistemas podem contribuir para a redução do desperdício de alimentos e dos riscos associados ao consumo de produtos deteriorados (Etxabide; Kilmartin; Maté, 2021; Roy; Rhim, 2021).

Paralelamente, a crescente demanda por materiais obtidos de fontes renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de filmes produzidos com biopolímeros e pigmentos naturais (Alizadeh-Sani *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Entre os pigmentos naturais, as antocianinas destacam-se pela elevada sensibilidade às variações de pH, ampla disponibilidade em fontes vegetais, baixa toxicidade e propriedades antioxidantes e antimicrobianas, características que favorecem sua aplicação em filmes indicadores de pH (Yin *et al.*, 2023; Becerril; Nerín; Silva, 2021).

A batata-doce de polpa roxa tem despertado interesse para o desenvolvimento de embalagens inteligentes devido ao seu elevado teor de antocianinas, pigmentos naturais capazes de atuar como indicadores de pH (Silva *et al.*, 2023a; Da Cunha Junior *et al.*, 2023). A utilização dessa matéria-prima em filmes biodegradáveis representa uma alternativa sustentável para o desenvolvimento de embalagens capazes de monitorar a qualidade e o frescor dos alimentos.

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) é uma cultura agrícola de grande importância econômica, amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais (Ji *et al.*, 2021). A espécie apresenta elevada produtividade, ciclo curto, boa adaptação a diferentes condições edafoclimáticas e tolerância à seca, além de demandar baixo uso de insumos agrícolas (Fernandes *et al.*, 2024; Saoakhova *et al.*, 2024). Atualmente, é considerada uma cultura estratégica para a segurança alimentar em diversos países, sendo o Brasil o maior produtor da América do Sul (FAOSTAT, 2023; Fernandes *et al.*, 2024).

Dentre as variedades existentes, a batata-doce de polpa roxa destaca-se pelo elevado valor nutricional e pela presença de compostos bioativos. Sua composição inclui carboidratos, fibras, minerais, aminoácidos, β -caroteno, ácido ascórbico e, principalmente, antocianinas, responsáveis pela coloração característica desse tubérculo (Hernández-Santos *et al.*, 2023; Meng *et al.*, 2023).

As antocianinas são compostos fenólicos pertencentes à classe dos flavonoides, caracterizados pela estrutura química básica C6-C3-C6, formada por dois anéis aromáticos ligados por um anel heterocíclico (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010). Esses pigmentos estão

amplamente distribuídos em fontes vegetais e são responsáveis pelas colorações vermelha, roxa, azul e violeta observadas em diversos frutos, flores e hortaliças. Uma das principais características das antocianinas é a elevada sensibilidade às condições do meio, especialmente às variações de pH. Além disso, fatores como temperatura, presença de enzimas, exposição à radiação ultravioleta, oxigênio e copigmentação também influenciam sua estabilidade (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; Roy; Rhim, 2021). Dentre esses fatores, o pH exerce maior influência sobre a estrutura química e, conseqüentemente, sobre a coloração das antocianinas.

Em meio aquoso, as antocianinas podem assumir diferentes formas estruturais de acordo com a variação do pH. Em valores entre 1 e 3, predomina o cátion flavílio, responsável pela coloração vermelha e pela maior estabilidade da molécula. Entre pH 4 e 5 ocorre a formação da pseudobase carbinol, resultando na perda da coloração. Em pH entre 6 e 7 predomina a base quinoidal, responsável pela coloração azulada. Já em pH superior a 7 ocorre a formação da chalcona, também incolor (Damodaran; Parkin; Fennema, 2010; Xue *et al.*, 2024).

Essa resposta colorimétrica frente às variações de pH torna as antocianinas excelentes indicadores naturais para embalagens inteligentes, permitindo o monitoramento da qualidade e do frescor dos alimentos por meio de mudanças visíveis de cor (Becerril; Nerín; Silva, 2021; Yin *et al.*, 2023).

Uma alternativa inovadora consiste na utilização direta da batata-doce de polpa roxa após tratamento térmico, sem a necessidade de uma etapa prévia de extração das antocianinas. Nessa abordagem, o tubérculo é cozido, liofilizado e posteriormente transformado em pó, sendo incorporado diretamente à formulação dos filmes indicadores. Resultados promissores foram obtidos na aplicação desses filmes para o monitoramento da deterioração de carne moída (Silva *et al.*, 2023a) e camarão (Li *et al.*, 2023), demonstrando o potencial dessa estratégia para o desenvolvimento de embalagens inteligentes.

Apesar dos resultados promissores obtidos em produtos cárneos e pescados, a aplicação desses sistemas em produtos lácteos ainda é pouco explorada. Nesse contexto, o leite bovino e o leite caprino destacam-se como matrizes de grande importância econômica e nutricional, apresentando elevado potencial para a aplicação de filmes inteligentes destinados ao monitoramento da qualidade e do frescor.

O leite bovino e o leite caprino são alimentos de elevado valor nutricional, caracterizados pela presença de proteínas, lipídios, lactose, vitaminas e minerais. O leite bovino destaca-se por ser um dos alimentos mais consumidos pela população devido à sua composição nutricional e às suas características físico-químicas (Strassburguer *et al.*, 2019). O leite caprino,

por sua vez, apresenta grande importância econômica, principalmente na região Nordeste do Brasil, onde a caprinocultura leiteira representa importante fonte de renda para pequenos produtores (Costa Ramos Neto, 2021).

A qualidade do leite é influenciada por fatores relacionados ao manejo, à alimentação, à genética, ao estágio da lactação e à sanidade dos animais (Santos; Fonseca, 2007). Dentre os principais problemas sanitários destaca-se a mastite, uma inflamação da glândula mamária causada, na maioria dos casos, por infecções bacterianas (Peleja *et al.*, 2006). Essa enfermidade altera a composição do leite, reduz sua qualidade e compromete a produtividade dos rebanhos, gerando prejuízos econômicos para a cadeia leiteira (Oliveira *et al.*, 2011).

Com o avanço das tecnologias aplicadas à indústria de laticínios, diferentes dispositivos vêm sendo desenvolvidos para monitorar a qualidade do leite em tempo real. Esses sistemas permitem detectar alterações relacionadas ao pH, à produção de gases durante a deterioração, à umidade e ao histórico de temperatura do alimento. Entre eles, os filmes inteligentes destacam-se por oferecerem um método simples, biodegradável e de fácil interpretação visual. Entretanto, a maior parte dos estudos disponíveis concentra-se em carnes e pescados, existindo poucas pesquisas voltadas para sua aplicação em leite bovino e caprino.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o aplicação e a caracterização de filmes inteligentes biodegradáveis contendo antocianinas de batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* L.), bem como a avaliação do seu potencial como indicadores colorimétricos de pH em leites bovino e caprino.

2 METODOLOGIA

A batata-doce de polpa roxa (BDPR) foi obtida na Fazendinha da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizada em Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil (latitude 22°48'00" S e longitude 43°41'00" O). A variedade utilizada possui casca branca com polpa roxa.

As soluções tampão com pH 4 (biftalato de potássio/hidróxido de sódio, Ref: 2739), pH 7 (fosfato dissódico/fosfato monobásico de potássio, Ref: 2740) e pH 10 (ácido bórico/cloreto de potássio, Ref: 1902) foram adquiridas da Neon Comercial Ltda. (São Paulo, Brasil). As soluções tampão para os demais valores de pH foram preparadas por ajuste com HCl 0,1 M e NaOH 0,1 M. O amido solúvel CAS [9005-25-8] foi adquirido da Êxodo Científica (São Paulo, Brasil). A carboximetilcelulose (CMC) e o glicerol de grau alimentício foram obtidos no mercado local em Seropédica, Brasil.

2.1 Preparo do pó liofilizado de batata-doce (PLBD)

O preparo do PLBD foi realizado com adaptações das metodologias descritas por Silva

et al. (2023) e Da Cunha Júnior et al. (2023). A batata-doce de polpa roxa (BDPR) foi selecionada, sendo processadas apenas as raízes que não apresentavam injúrias. Em seguida, foram lavadas para remoção da sujidade aparente, sanitizadas por imersão em solução de hipoclorito de sódio a 200ppm por 15 minutos, descascadas manualmente, cortadas em pedaços de aproximadamente 5 cm² e cozidas por imersão em água a 80 °C durante 10 minutos. Após o tratamento térmico, a batata, juntamente com a água do cozimento, foi processada em liquidificador até a obtenção de um purê homogêneo. Em seguida, o purê foi acondicionado em embalagens plásticas, congelado a -18 °C e posteriormente desidratado em liofilizador de bancada (Liotop®, modelo L101) até a secagem completa. Posteriormente, o material foi submetido a duas triturações em moinho analítico IKA A11 e a uma moagem em moinho planetário (Retsch®, modelo PM 100), sendo classificado por peneiramento para obtenção das frações com granulometria inferior a 740µm e 125µm. A fração com granulometria de 125µm foi submetida à secagem complementar em estufa a 60 °C por 12 horas, enquanto a fração inferior a 740 µm foi utilizada diretamente. Os pós obtidos foram armazenados em recipientes herméticos a 4 °C.

2.2 Rendimento

O rendimento do pó liofilizado de batata-doce (PLBD) foi determinado considerando a quantidade de umidade eliminada ao longo do processamento, tendo como referência a massa inicial da batata utilizada, conforme demonstrado na Equação 1:

$$Rendimento (\%) = \frac{(M - m)}{M \times 100}$$

Equação 1

Em que:

M é a massa de purê de batata doce, em gramas, antes da liofilização;

m é a massa final, em gramas, do pó obtida após a liofilização.

2.3 Alteração visual de cor do PLBD em soluções de diferentes valores de pH

A capacidade de mudança de cor do PLBD foi analisada com base na metodologia descrita por Chen et al. (2020), com algumas adaptações. Para a análise, foram adicionados 0,30 g de PLBD em 20 mL de soluções tampão com pH variando de 1 a 11, permanecendo em contato por 30 minutos. Em seguida, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos a 840 × g, utilizando uma centrífuga analógica (FANEM, 204-N, Brasil). Após a centrifugação, o sobrenadante foi coletado em tubos de vidro de 5 mL, e foi realizado o registro fotográfico das

soluções.

2.4 Caracterização da BDPR e do PLBD

2.4.1 Composição

A composição do PLBD foi determinada por meio da análise dos teores de umidade, cinzas, carboidratos totais e amido total, conforme os procedimentos descritos por IAL (2008), com alterações. O amido total foi determinado por meio do método de hidrólise ácida assistida por temperaturas elevadas em autoclave (121 °C/1 atm) (IAL, 2008).

2.4.2 Teor de Antocianinas Monoméricas Totais (AMT)

O teor de antocianinas totais (AMT) do PLBD foi determinado com base nos procedimentos descritos por Du et al. (2021) e Lee et al. (2005), com as devidas modificações. A extração foi realizada a partir de 1,5 g de PLBD, utilizando 30 mL de solução etanólica aquosa acidificada (60% v/v), submetida a banho de ultrassom por 2 horas. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a $3.570 \times g$, durante 20 minutos, a 4 °C, e os sobrenadantes obtidos foram filtrados. O teor de AMT foi determinado a partir desses extratos por meio do método do pH diferencial (pH 1,00 e 4,50), utilizando cianidina-3-glicosídeo como padrão. Para isso, 2,0 mL do extrato foram misturados com 3,0 mL de tampão de cloreto de potássio 0,025 M (pH 1,0), e, paralelamente, outros 2,0 mL do extrato foram adicionados a 3,0 mL de tampão de acetato de sódio 0,4 M (pH 4,5). As misturas foram homogeneizadas, mantidas em repouso por 15 minutos e, posteriormente, filtradas. As leituras de absorvância foram realizadas nos comprimentos de onda de 530 e 700 nm, utilizando um espectrofotômetro (modelo WUV-M51, WEBLABORSP, Mogi das Cruzes, São Paulo, Brasil). O conteúdo de antocianinas monoméricas foi determinado pelas Equações 2 e 3:

$$A = [(A_{520nm/pH1,00} - A_{700nm/pH1,00}) - (A_{520nm/pH4,50} - A_{700nm/pH4,50})]$$

Equação 2

$$AMT = \left(\frac{A}{\epsilon L} \right) \times MM \times 100 \times fd$$

Equação 3

Em que:

A é a absorvância corrigida pela diferença entre as absorvâncias registradas nas leituras em pH 1,00 e pH 4,50;

ϵ é o coeficiente de extinção molar da antocianina;

L é o comprimento do caminho óptico (1 cm);

MM é a massa molecular da antocianina.

2.4.3 Preparo dos filmes

Os filmes foram preparados com base em uma adaptação da metodologia descrita por Silva (2023), utilizando amido, carboximetilcelulose (CMC), glicerol e PLBD. Inicialmente, foi preparada uma solução de amido pela dissolução de 4 g de amido em 100 mL de água deionizada (4% m/v). Paralelamente, foi preparada uma solução de CMC contendo 1,5 g de CMC dissolvidos em 100 mL de água deionizada (1,5% m/v).

Para todas as formulações, foram adicionados 1,2 g de glicerol como plastificante à solução filmogênica. O PLBD foi incorporado em concentrações de 2 g ou 4 g, utilizando diferentes granulometrias e tratamentos de sonicação. As formulações elaboradas estão apresentadas na Tabela 1.

Após a adição dos componentes, as dispersões foram mantidas sob agitação com bastão de vidro à temperatura ambiente até completa homogeneização. Nos tratamentos que envolveram sonicação, as soluções filmogênicas foram submetidas à ultrassonicação para promover melhor dispersão das partículas de PLBD na matriz polimérica. Além disso, foi preparado um filme controle, sem a adição do PLDB, com o objetivo de avaliar possíveis interferências da matriz na resposta do sistema.

Tabela 8. Quantidades de PLDB e solução de CMC a serem adicionadas.

Filme	Formulação	Massa de CMC (g)
1	Controle (sem PLDB)	
2	2 g de PLDB inferior a 740 µm	
3	4 g de PLDB inferior a 740 µm	
4	2 g de PLDB inferior a 125µm	
5	4 g de PLDB inferior a 125µm	30g de solução 1,5 % m/v
6	2 g de PLDB inferior a 740 µm + sonicação	
7	4 g de PLDB inferior a 740 µm + sonicação	
8	2 g de PLDB inferior a 125µm + sonicação	
9	4 g de PLDB inferior a 125µm + sonicação	

Após a mistura, as soluções filmogênicas permaneceram em banho-maria com agitação

(Solab, SL-155, Brasil) a 90 °C por uma hora, sendo agitadas manualmente com um bastão de vidro a cada 10 minutos. Após o resfriamento até a temperatura ambiente, as soluções foram filtradas para assegurar a uniformidade e, em seguida, vertidas em placas de Petri (0,34 g/cm²). Finalmente, as placas foram inseridas em estufa ventilada (Solab, SL 102, Brasil) a 40 °C durante 12 horas. Antes de serem caracterizados, os filmes foram estabilizados por, no mínimo, 48 horas em dessecador.

2.3 Caracterização dos filmes

2.3.1 Avaliação subjetiva dos filmes

Os filmes foram avaliados subjetivamente por meio de uma escala de três pontos (excelente, bom ou ruim), considerando os aspectos de estrutura (ausência de fraturas ou rupturas após a secagem), homogeneidade (ausência de partículas insolúveis, bolhas visíveis a olho nu, regiões opacas ou diferenças de coloração) e manuseabilidade (facilidade de ruptura do filme) (Monterrey & Sobral, 1999).

2.3.2 Resposta colorimétrica dos filmes em soluções diferentes valores de pH

Para avaliar a resposta colorimétrica dos filmes em diferentes valores de pH, os filmes foram cortados em quadrados e imersos em soluções tampão com pH variados (2, 4, 6, 8 e 10) por 2 minutos. Em seguida, os filmes foram fotografados para a análise subjetiva das alterações de cor. Os resultados dessa análise revelaram a eficácia dos filmes como indicadores colorimétricos, demonstrando sua capacidade de responder visualmente a variações de pH por meio de mudanças de cor perceptíveis (Silva *et al.* 2023; Da Cunha Júnior *et al.* 2023)

2.3.3 Caracterização física e química

Foi determinada a espessura dos filmes utilizando um micrômetro digital. As propriedades ópticas, incluindo transparência e capacidade de absorção na região do UV-Vis, foram analisadas.

A morfologia superficial dos filmes foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio VEGA3 (TESCAN, Praga, República Tcheca) localizado no Laboratório de Processos de Separação com Membranas do Programa de Engenharia da Nanotecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), operando com tensão de aceleração de 10 kV. Antes das análises, as amostras foram metalizadas com ouro para aumentar sua condutividade elétrica e melhorar a qualidade das imagens obtidas.

A molhabilidade do filme foi caracterizada por medição do ângulo de contato com água, utilizando o equipamento goniômetro (OCA15, Dataphysics), localizado no Laboratório de

Engenharia dos Fenômenos Interficiais do Programa de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Amostras do filme foram posicionadas em uma base plana, e uma gota de água ultrapura foi depositada sobre a superfície; o ângulo formado entre a gota e o filme foi registrado.

Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos filmes foram obtidos para identificar os principais grupos funcionais presentes e avaliar possíveis interações químicas entre os componentes da matriz filmogênica e o pó de batata-doce de polpa roxa. As análises foram realizadas no modo de refletância total atenuada (ATR), utilizando um espectrômetro Shimadzu IRSpirit, localizado no Laboratório de Nanotecnologia Biofuncional da Faculdade de Farmácia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Os espectros foram registrados na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras para cada amostra.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada conforme a metodologia descrita por Kevij et al. (2020). As amostras foram analisadas em um equipamento Setline STA localizado no Laboratório de Nanotecnologia, Cerâmicas e Compósitos do Departamento de Engenharia de Materiais da universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), na faixa de temperatura de 25 a 500 $^{\circ}\text{C}$, utilizando uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$.

2.3.4 Caracterização mecânica

As propriedades mecânicas dos filmes foram determinadas em um analisador de textura TX-700 (Texture Analyser). As amostras foram cortadas em tiras de 10 × 50 mm. Os filmes foram submetidos ao ensaio de tração utilizando garras com distância inicial de 30 mm entre elas e velocidade de deslocamento de 10 mm s^{-1} . A espessura de cada amostra foi previamente determinada e utilizada pelo software para o cálculo da resistência à tração (MPa) e do módulo de Young (MPa). Durante o ensaio foram obtidos a força máxima de ruptura (F_{max} , N), a alongação na ruptura (%), a resistência à tração (MPa) e o módulo de Young (MPa). Foram realizadas três repetições para cada formulação.

2.3.5 Biodegradabilidade

A biodegradabilidade dos filmes foi avaliada por meio do teste de enterramento em solo, adaptado de Wu et al. Amostras dos filmes foram cortadas em dimensões de aproximadamente 2 × 2 cm e enterradas individualmente em recipientes plásticos contendo solo, permanecendo completamente cobertas. A umidade do solo foi mantida por meio da borrifação diária de água durante todo o período experimental. Os filmes foram monitorados visualmente quanto às alterações estruturais e ao processo de degradação.

2.3.6 Análise de cor

A cor dos filmes foi determinada utilizando um colorímetro portátil (HunterLab®, modelo MiniScan EZ 4500L), previamente calibrado com os padrões branco e preto fornecidos pelo fabricante. As medições foram realizadas em diferentes regiões da superfície dos filmes, obtendo-se os parâmetros do sistema CIELAB: luminosidade (L^*), coordenada vermelho-verde (a^*) e coordenada amarelo-azul (b^*).

A partir desses parâmetros, foram calculados a diferença total de cor (ΔE) e o croma (C^*), de acordo com as Equações 4 e 5:

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

Equação 4

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

Equação 5

em que L^*_0 , a^*_0 e b^*_0 correspondem aos valores de referência utilizados para o cálculo da diferença de cor.

A opacidade dos filmes foi determinada por meio da razão entre os valores de luminosidade obtidos sobre os padrões preto (L^*_{Preto}) e branco (L^*_{Branco}), conforme a Equação 6:

$$\text{Opacidade (\%)} = \left(\frac{L^*_{\text{Preto}}}{L^*_{\text{Branco}}} \right) \times 100$$

Equação 6

2.3.6 Curva modelo de alteração do pH do leite bovino e caprino

Foram utilizadas amostras comerciais de leite bovino Nestlé® e leite caprino em pó Caprilat®, adquiridas no mercado local. O leite caprino foi reconstituído de acordo com as instruções do fabricante. Posteriormente, as amostras de leite bovino e caprino tiveram seus valores de pH ajustados para 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 7,5 e 8,0, utilizando soluções de HCl 40 mol L⁻¹ (pH 1,58) e NaOH 20% (pH 13,96).

Para a avaliação da resposta colorimétrica, os filmes foram cortados em quadrados e colocados em contato direto com as amostras de leite previamente ajustadas para os diferentes valores de pH. Cada filme foi acondicionado juntamente com a respectiva amostra em recipientes transparentes, permitindo a observação visual das alterações de cor.

Após a imersão dos filmes nas amostras, as mudanças colorimétricas foram

acompanhadas durante 1 minuto, sendo registradas imagens através de um dispositivo móvel. As fotografias foram obtidas sob condições padronizadas de iluminação e distância, visando minimizar interferências externas e garantir a reprodutibilidade das análises.

As alterações visuais observadas nos filmes foram utilizadas para avaliar qualitativamente a sensibilidade e a capacidade de resposta do indicador frente às diferentes condições de pH, determinando seu potencial para aplicação como sensor colorimétrico em leites bovino e caprino.

2.3.7 Aplicação prática dos filmes para o monitoramento do pH do leite bovino

A aplicação prática dos filmes foi realizada no setor de Bovinocultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com o objetivo de avaliar sua eficiência no monitoramento das variações de pH do leite em condições reais de produção.

Para a avaliação, foram selecionados animais clinicamente sadios e animais diagnosticados com mastite. Amostras de leite foram coletadas e colocadas em contato com os filmes inteligentes, permitindo a observação das alterações de coloração decorrentes das diferenças de pH entre as amostras.

A resposta colorimétrica dos filmes foi comparada com a curva padrão realizada em laboratório.

2.4 Análise Estatística

Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão. Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas entre as formulações. Quando observadas diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Liofilização, moagem e peneiramento

O processo de liofilização teve uma duração média de 15 dias. Após moagem e peneiramento, obteve-se um pó fino, de coloração arroxeada, uniforme e estável, conforme apresentado na Figura 2:

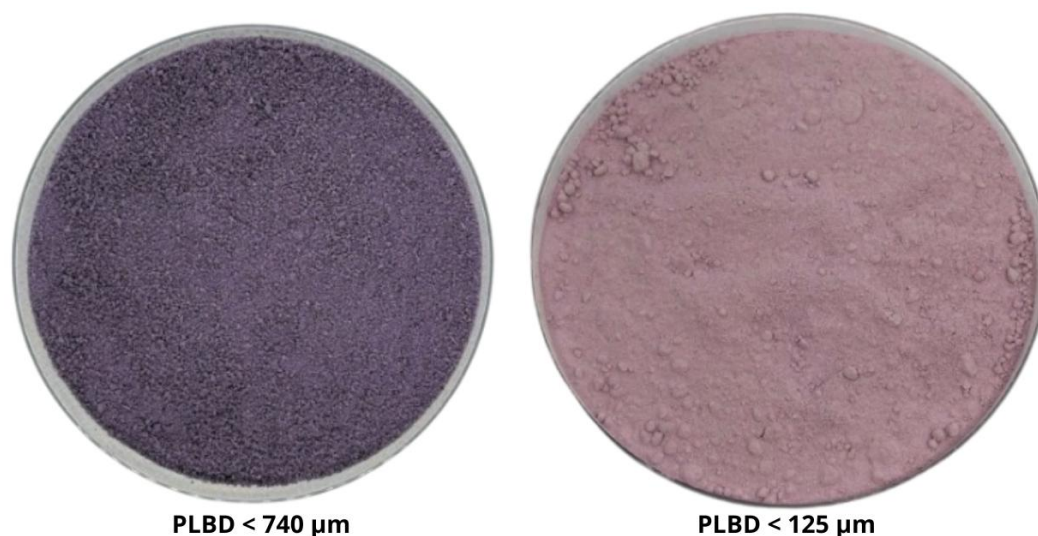


Figura 6. Pó liofilizado da batata doce de polpa roxa

3.2 Rendimento

O rendimento do PLDB foi de 31,74% da massa inicial da batata-doce, valor superior ao reportado por Araújo et al. (2015), que observaram rendimentos entre 18,43% e 25,25% para farinha de batata-doce obtida por diferentes métodos de secagem. Por outro lado, o resultado encontrado foi semelhante aos valores relatados por Da Cunha *et al.* (2023), que variaram de 27,30% a 32,98% para pó liofilizado de batata-doce.

As diferenças observadas entre os estudos podem estar relacionadas ao teor inicial de umidade da matéria-prima, à técnica de secagem empregada e às condições de processamento (Pilon et al., 2020; Silva et al., 2020). A umidade final do PLDB foi de $5,32\% \pm 0,01$, indicando elevada remoção de água durante a liofilização. Esses resultados demonstram a eficiência do processo na obtenção de um produto com baixa umidade e rendimento satisfatório, características importantes para sua estabilidade e aplicação posterior.

3.3 Análise de cor do PLBD

Tabela 9. Análise de cor do PLBD

Amostra	L*	a*	b*	C*
PLBD <740μm	49,21 ± 0,44 ^b	7,25 ± 0,06 ^b	-8,46 ± 0,07 ^a	11,14 ± 0,08 ^a
PLBD <125μm	70,54 ± 0,35 ^a	9,88 ± 0,12 ^a	-4,36 ± 0,05 ^b	10,80 ± 0,11 ^b

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os parâmetros colorimétricos do PLBD mostraram que a redução do tamanho da partícula influenciou significativamente sua aparência visual. O PLBD inferior a 125μm

apresentou maior luminosidade ($L^* = 70,54$), indicando coloração mais clara quando comparado ao PLBD inferior a $740\mu\text{m}$ ($L^* = 49,21$). Além disso, o pó moído apresentou maior valor de a^* (9,88), evidenciando intensificação dos tons avermelhados. Em contrapartida, o PLBD de $740\mu\text{m}$ apresentou valores mais negativos de b^* (-8,46), indicando maior predominância de tonalidades azuladas associadas às antocianinas.

Esse resultado pode estar relacionado às alterações nas propriedades ópticas do material promovidas pela moagem. Deve-se considerar, ainda, que a fração inferior a $125\mu\text{m}$ foi submetida a uma secagem complementar em estufa a 60°C durante 12 horas, enquanto a fração de maior granulometria não recebeu esse tratamento. Dessa forma, as diferenças observadas podem resultar do efeito combinado da granulometria e da secagem adicional. A redução da umidade pode favorecer maior reflexão da luz e contribuir para o aumento de L^* . Por outro lado, a exposição térmica pode ocasionar alterações químicas, oxidação ou degradação parcial dos pigmentos, influenciando os valores de a^* e b^* . Assim, para atribuir as diferenças exclusivamente ao tamanho das partículas, seria necessário submeter ambas as frações às mesmas condições de secagem e armazenamento.

3.4 Alteração visual de cor do PLBD em soluções de diferentes valores de pH

A alteração visual de cor do PLBD em soluções de diferentes valores de pH pode ser observada na Figura 3:



Figura 7. Alterações de cor do PLBD em diferentes valores de pH

Observou-se uma ampla variação de cor do PLBD em função do pH do meio, evidenciando a sensibilidade das antocianinas às condições de acidez e alcalinidade. Em meios fortemente ácidos, especialmente entre pH 1 e 3, as soluções apresentaram tonalidades predominantemente rosadas e avermelhadas. Essa coloração está associada à predominância da forma protonada das antocianinas, particularmente do cátion flavílio, estruturalmente mais estável em condições de elevada acidez (Azzini *et al.*, 2017; Damodaran *et al.*, 2010; Silva *et*

al., 2023).

Com o aumento do pH, entre aproximadamente 4 e 6, verificou-se redução gradual da intensidade da coloração rosada, acompanhada pelo aparecimento de tonalidades violáceas. Esse comportamento pode ser atribuído às transformações estruturais das antocianinas, que passam a coexistir em diferentes formas químicas, incluindo espécies menos intensamente coloridas. Próximo à neutralidade, entre pH 7 e 9, foram observadas tonalidades azuladas e azul-acinzentadas, relacionadas à maior participação das formas quinoidais das antocianinas (Azzini *et al.*, 2017; Damodaran *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2023).

Em condições alcalinas, a partir de aproximadamente pH 10, as soluções apresentaram tonalidades esverdeadas, evoluindo para amarelo-esverdeadas e amarelas nos valores mais elevados de pH. Essa alteração está associada à redução da estabilidade das antocianinas em meio alcalino, podendo ocorrer abertura do anel heterocíclico, rearranjos moleculares e formação de produtos de degradação com colorações distintas. Assim, a mudança de rosa-avermelhado para violeta, azul, verde e amarelo demonstra que o PLBD apresenta resposta colorimétrica visível em ampla faixa de pH (Azzini *et al.*, 2017; Damodaran *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2023).

Esses resultados confirmam o potencial do PLBD como fonte natural de pigmentos sensíveis ao pH para aplicação em filmes inteligentes. A resposta visual observada é particularmente relevante para o desenvolvimento de indicadores destinados ao monitoramento da qualidade de alimentos, uma vez que alterações químicas e microbiológicas durante a deterioração podem modificar o pH do produto e, conseqüentemente, provocar mudanças perceptíveis na cor do material indicador (Azzini *et al.*, 2017; Damodaran *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2023).

3.5 Caracterização do PLBD

O teor de umidade do pó com granulometria inferior a 740µm foi de $5,32 \pm 0,01\%$, enquanto a fração com granulometria inferior a 125µm, submetida à secagem complementar em estufa, apresentou $4,68 \pm 1,44\%$, indicando baixo teor de água em ambas as amostras. Silva *et al.* (2023) relataram teor de umidade de 2,76%, enquanto Da Cunha Júnior *et al.* (2023) encontraram valores entre 2,66 e 5,26% para pós liofilizados de batata-doce de polpa roxa, corroborando os resultados obtidos neste estudo. A baixa umidade é uma característica desejável, pois contribui para maior estabilidade físico-química, redução da atividade de água e prolongamento da vida útil do produto (Nowak & Jakubczyk, 2020).

Em relação aos carboidratos totais, a fração com granulometria inferior a 740 µm

apresentou teor de $84,88 \pm 0,28\%$, enquanto a fração com granulometria inferior a $125\mu\text{m}$ apresentou $75,60 \pm 0,40\%$. Em ambas as amostras, os carboidratos constituíram a principal fração da matéria seca, resultado esperado devido ao elevado conteúdo de amido presente na batata-doce, especialmente nas cultivares de polpa roxa. A redução observada na fração submetida à secagem complementar em estufa pode estar relacionada a alterações promovidas pelo aquecimento, como reações de escurecimento não enzimático e modificações estruturais da matriz vegetal, que podem influenciar a eficiência de extração e quantificação dos carboidratos.

O teor de cinzas foi de $1,97 \pm 0,002\%$ para a fração inferior a $740\mu\text{m}$ e de $0,84 \pm 1,08\%$ para a fração inferior a $125\mu\text{m}$. Esses resultados indicam a presença de minerais em ambas as amostras e encontram-se próximos aos valores descritos para farinhas e pós de batata-doce, geralmente variando entre 1 e 3%, dependendo da cultivar, das condições de cultivo e do método de processamento (Qiu et al., 2019; Hernández-Santos et al., 2023). Silva et al. (2023), utilizando liofilização, encontraram teor de cinzas de 1,27%, valor semelhante ao observado para a fração inferior a $740\mu\text{m}$. A menor média obtida para a fração submetida à estufa pode estar relacionada à variabilidade analítica ou à distribuição heterogênea dos minerais entre as frações obtidas após o peneiramento, uma vez que os minerais são termicamente estáveis e não sofrem degradação nas temperaturas normalmente empregadas em estufas.

Quanto ao teor de antocianinas monoméricas totais, a fração com granulometria inferior a $740\mu\text{m}$ apresentou $31,20 \pm 0,20\text{ mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$, enquanto a fração com granulometria inferior a $125\mu\text{m}$ apresentou $20,30 \pm 0,10\text{ mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$. Pilon et al. (2020) encontraram valores entre 22,74 e $75,96\text{ mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$, indicando que o teor obtido para a fração inferior a $740\mu\text{m}$ encontra-se dentro da faixa reportada. A redução observada na fração submetida à secagem complementar em estufa pode ser atribuída à maior exposição ao calor, uma vez que as antocianinas são compostos termossensíveis e suscetíveis à degradação térmica. Em contrapartida, a liofilização ocorre sob baixas temperaturas e pressão reduzida, preservando de forma mais eficiente esses compostos bioativos (Nowak & Jakubczyk, 2020).

De maneira geral, os resultados demonstram que tanto a granulometria quanto a etapa adicional de secagem em estufa influenciaram as características físico-químicas do pó. A fração inferior a $740\mu\text{m}$, obtida exclusivamente por liofilização, apresentou maior preservação dos carboidratos, minerais e, principalmente, das antocianinas, enquanto a fração inferior a $125\mu\text{m}$, submetida à secagem complementar em estufa, apresentou menor teor desses constituintes.

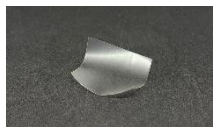
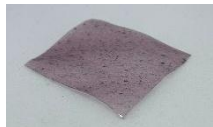
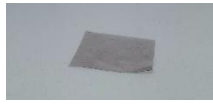
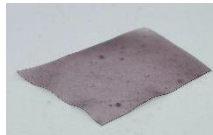
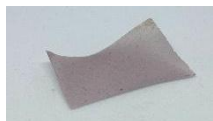
Tabela 10. Parâmetros de caracterização do PLBD

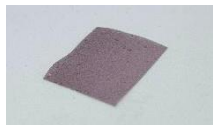
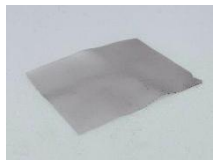
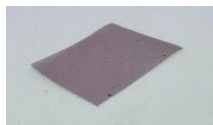
Parâmetro	PLBD < 740µm	PLBD < 125µm
Umidade (%)	5,32 ± 0,01 ^a	4,68 ± 1,44 ^a
Carboidratos totais (%)	84,88 ± 0,28 ^a	75,60 ± 0,40 ^a
Cinzas (%)	1,97 ± 0,002 ^a	0,84 ± 1,08 ^a
Antocianinas Monoméricas Totais (mg.100 g ⁻¹)	31,20 ± 0,20 ^a	20,30 ± 0,10 ^a

3.6 Avaliação subjetiva do filme

Os filmes foram avaliados e classificados em três pontos: excelente (3), boa (2) e ruim (1), conforme demonstrado na Tabela abaixo.

Tabela 11. Avaliação subjetiva dos filmes

Filme	Estrutura	Homogeneidade	Manuseabilidade	Foto
1	2	3	2	
2	3	2	3	
3	3	1	3	
4	3	2	2	
5	3	2	2	
6	2	3	1	

7	2	3	2	
8	3	3	1	
9	3	3	2	

A análise subjetiva dos filmes revelou diferenças em relação à estrutura, homogeneidade e manuseabilidade das formulações. O Filme 1 apresentou boa homogeneidade, porém menor integridade estrutural e manuseabilidade quando comparado a alguns dos filmes contendo PLBD. Durante a remoção das placas de Petri, observou-se maior aderência do filme controle à superfície, resultando em maior dificuldade de destacamento e aspecto mais quebradiço durante o manuseio.

De maneira geral, a incorporação do PLBD promoveu melhorias na estrutura dos filmes, especialmente nas formulações contendo maiores concentrações do pó. Os Filmes 3, 4, 5, 8 e 9 receberam a pontuação máxima para estrutura, indicando formação de matrizes mais contínuas e visualmente estáveis. Entretanto, os Filmes 3, 4 e 5 apresentaram menor homogeneidade visual, evidenciada pela presença de partículas dispersas ao longo da matriz filmogênica, possivelmente devido à dispersão incompleta do PLBD durante o preparo da solução.

Os filmes submetidos à sonicação (Filmes 6, 7, 8 e 9) apresentaram, de modo geral, melhor homogeneidade quando comparados às formulações não sonicadas. Esse resultado sugere que o tratamento ultrassônico favoreceu a dispersão das partículas de PLBD na matriz polimérica, reduzindo a formação de aglomerados e proporcionando aparência mais uniforme.

Em relação à manuseabilidade, os Filmes 7 e 9 apresentaram os melhores resultados, recebendo a pontuação máxima (3). Esses filmes demonstraram maior resistência mecânica durante a manipulação, sem ocorrência de rasgos ou deformações significativas. Em contrapartida, os Filmes 3 e 6 apresentaram menor facilidade de manuseio, indicando que, embora possuísem boa estrutura visual, sua resistência mecânica foi inferior às demais formulações.

Considerando conjuntamente os critérios avaliados, o Filme 9 apresentou o melhor desempenho geral, obtendo pontuação máxima para estrutura, homogeneidade e

manuseabilidade. Esse resultado indica que a combinação entre maior concentração de PLBD, menor granulometria e aplicação da sonicação favoreceu a obtenção de um filme mais uniforme, resistente e adequado para aplicações como embalagem inteligente. Dessa forma, estratégias como a redução do tamanho de partícula e o uso da ultrassonicação mostraram-se promissoras para melhorar a qualidade visual e funcional dos filmes, corroborando observações reportadas por Silva et al. (2023).

3.7 Análise de cor dos filmes

A Tabela 12 apresenta os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , ΔE) e a opacidade dos filmes desenvolvidos. A incorporação do PLBD promoveu alterações significativas em todos os parâmetros avaliados quando comparados ao filme controle (Filme 1). O controle apresentou a maior luminosidade ($L^* = 83,17$), indicando uma matriz mais clara, enquanto a adição do pó reduziu progressivamente esse parâmetro, evidenciando o escurecimento dos filmes em decorrência da incorporação das antocianinas e dos demais constituintes presentes na batata-doce de polpa roxa. Resultado semelhante foi observado por **Silva et al. (2023a)**, que desenvolveram filmes indicadores à base de amido, CMC e pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa e verificaram redução da luminosidade com o aumento da concentração do pó, atribuindo esse comportamento ao maior teor de pigmentos incorporados à matriz filmogênica.

Tabela 12. Parâmetros colorimétricos (L , a , b^* , C^* e ΔE) e opacidade dos filmes

Filme	L^*	a^*	b^*	C^*	ΔE	Opacidade (%)
1	$83,17 \pm 0,85^a$	$-0,99 \pm 0,11^g$	$2,30 \pm 0,24^d$	2,50	0,00	$6,48 \pm 0,58$
2	$75,88 \pm 0,40^c$	$1,89 \pm 0,05^e$	$2,18 \pm 0,11^d$	2,89	7,84	$7,37 \pm 1,15$
3	$72,69 \pm 0,37^d$	$4,15 \pm 0,21^c$	$5,97 \pm 0,14^a$	7,27	12,51	$4,78 \pm 0,16$
4	$78,70 \pm 0,14^b$	$1,43 \pm 0,02^f$	$3,89 \pm 0,02^c$	4,14	5,10	$4,25 \pm 0,11$
5	$70,36 \pm 0,42^e$	$5,94 \pm 0,14^a$	$5,08 \pm 0,06^b$	7,82	14,91	$5,48 \pm 0,26$
6	$71,18 \pm 0,77^e$	$2,12 \pm 0,10^d$	$1,74 \pm 0,05^e$	2,74	12,13	$21,52 \pm 2,14$
7	$59,69 \pm 0,56^g$	$4,74 \pm 0,09^b$	$-0,58 \pm 0,06^f$	4,78	24,43	$38,70 \pm 3,58$
8	$73,19 \pm 0,51^d$	$1,83 \pm 0,06^e$	$2,16 \pm 0,01^d$	2,83	10,40	$7,41 \pm 1,48$
9	$65,40 \pm 1,09^f$	$3,82 \pm 0,31^c$	$1,92 \pm 0,16^e$	4,28	18,28	$8,10 \pm 0,25$

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Esses resultados demonstram que maiores concentrações de PLBD intensificaram a

coloração avermelhada dos filmes e reduziram sua luminosidade, provavelmente devido ao maior teor de antocianinas incorporado à matriz filmogênica. Esse comportamento está de acordo com as características da batata-doce de polpa roxa descritas por Da Cunha Junior *et al.* (2023), que relataram elevada concentração de compostos fenólicos e antocianinas no pó liofilizado, responsáveis pela intensa coloração do material.

O efeito da concentração de PLBD foi evidente nas formulações não sonicadas. Nos filmes produzidos com partículas inferiores a 740 μm , o aumento da concentração de 2 para 4 g reduziu a luminosidade (L^*) de 75,88 para 72,69 e elevou o parâmetro a^* de 1,89 para 4,15. Tendência semelhante foi observada nas formulações produzidas com partículas inferiores a 125 μm , nas quais L^* diminuiu de 78,70 para 70,36 e a^* aumentou de 1,43 para 5,94. Esses resultados demonstram que maiores concentrações de PLBD intensificaram a coloração avermelhada dos filmes e reduziram sua luminosidade, provavelmente devido ao maior teor de antocianinas incorporado à matriz filmogênica. Miao *et al.* (2023) também relataram redução dos valores de L^* com o aumento da concentração de antocianinas em filmes à base de PVA, associando esse comportamento ao maior conteúdo de pigmentos distribuídos na matriz.

Os valores de b^* foram positivos para a maioria das formulações, indicando predominância da componente amarela. Os maiores valores foram registrados nos Filmes 3 e 5, ambos contendo 4 g de PLBD, reforçando a influência da concentração do pó sobre a tonalidade dos filmes. O Filme 7 foi a única exceção, apresentando valor negativo para b^* (-0,58), indicando deslocamento da coloração para a região azul. Esse comportamento pode estar relacionado ao efeito combinado da maior concentração de PLBD, da granulometria mais elevada e da sonicação, fatores que podem modificar a distribuição das partículas e a interação dos pigmentos com a matriz polimérica. Resultados semelhantes foram descritos por Yong *et al.* (2022), que observaram alterações nos parâmetros a^* e b^* em função da matriz utilizada e da concentração de antocianinas, evidenciando que a composição do filme interfere diretamente na resposta óptica do material.

A cromaticidade (C^*) aumentou com a incorporação do PLBD, sendo os maiores valores observados nos Filmes 5 (7,82) e 3 (7,27), indicando coloração mais intensa e saturada. Em contrapartida, os Filmes 2, 6 e 8 apresentaram valores inferiores a 3, caracterizando coloração menos intensa. Esses resultados indicam que a concentração de PLBD exerceu maior influência sobre a intensidade da cor do que a granulometria isoladamente. Tendência semelhante foi observada por Ke *et al.* (2024), que relataram aumento da intensidade da cor em filmes contendo maiores concentrações de extrato de batata-doce de polpa roxa.

A diferença total de cor (ΔE), calculada em relação ao Filme 1, confirmou que todas as

formulações contendo PLBD apresentaram alterações visíveis de coloração. Os maiores valores foram obtidos para os Filmes 7 (24,43), 9 (18,28) e 5 (14,91). O Filme 7 apresentou a maior diferença total de cor entre todas as formulações, enquanto o Filme 9 também apresentou elevada distinção visual em relação ao controle. Esses resultados demonstram que a combinação entre maior concentração de PLBD e sonicação intensificou as alterações colorimétricas dos filmes. Segundo Becerril, Nerín e Silva (2021), maiores valores de ΔE favorecem a percepção visual das mudanças de cor, característica desejável em filmes inteligentes destinados ao monitoramento da qualidade dos alimentos.

A sonicação promoveu efeitos distintos de acordo com a granulometria e a concentração de PLBD. Nas formulações produzidas com partículas inferiores a 740 μm , verificou-se redução da luminosidade e aumento expressivo da opacidade, principalmente no Filme 7, cuja opacidade aumentou de 4,78% para 38,70%. Esse comportamento indica que o tratamento ultrassônico modificou a organização da matriz filmogênica, alterando sua interação com a luz. Entretanto, os mecanismos responsáveis por esse comportamento não podem ser determinados apenas pelos resultados obtidos neste estudo, sendo necessárias análises complementares, como microscopia eletrônica de varredura.

Nas formulações produzidas com partículas inferiores a 125 μm , o efeito da sonicação sobre a opacidade foi menos pronunciado. O Filme 8 apresentou opacidade de 7,41%, valor próximo ao observado para o Filme 2 (7,37%), enquanto o Filme 9 apresentou opacidade de 8,10%, permanecendo muito inferior à registrada para o Filme 7. Esses resultados indicam que o efeito da sonicação depende da interação entre concentração, granulometria e organização das partículas na matriz polimérica.

De modo geral, a opacidade variou entre 4,25% e 38,70%. Os maiores valores foram observados nos Filmes 6 e 7, ambos produzidos com partículas inferiores a 740 μm e submetidos à sonicação. A maior opacidade pode ser vantajosa por reduzir a incidência de luz sobre os pigmentos e sobre o alimento embalado, contribuindo para maior estabilidade do sistema. Entretanto, valores excessivamente elevados podem dificultar a visualização das alterações colorimétricas, sendo necessário estabelecer um equilíbrio entre proteção luminosa e facilidade de leitura do indicador, conforme discutido por Roy e Rhim (2021).

De forma geral, a concentração de PLBD foi o principal fator responsável pela redução da luminosidade e pelo aumento dos valores de a^* , C^* e ΔE . A sonicação potencializou esses efeitos principalmente nas formulações produzidas com partículas inferiores a 740 μm , com destaque para o Filme 7, que apresentou a maior diferença total de cor e a maior opacidade entre todas as formulações. Esses resultados demonstram que tanto a concentração do PLBD

quanto o processamento influenciam diretamente as propriedades ópticas dos filmes, permitindo a obtenção de materiais com diferentes características para aplicação como indicadores colorimétricos.

3.8 Resposta colorimétrica dos filmes em soluções de diferentes valores de pH

A Figura 8 apresenta a resposta colorimétrica dos filmes após serem submersos em soluções tampões de diferentes valores de pH.

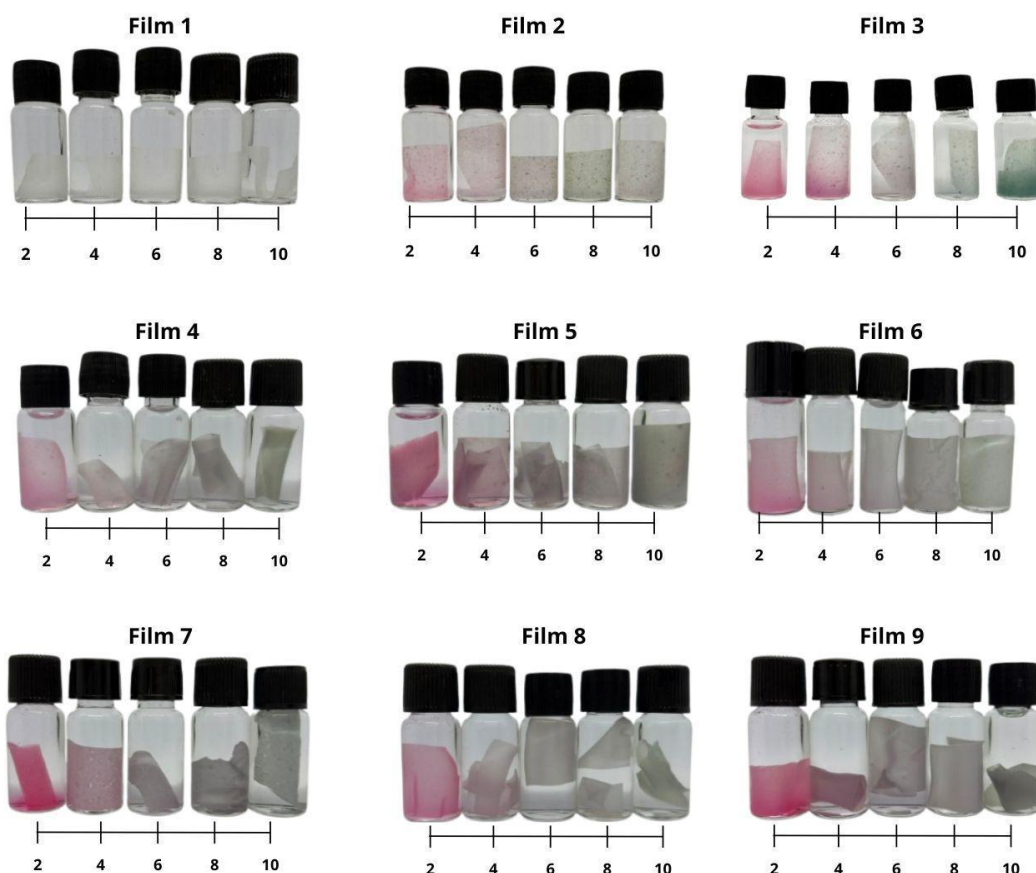


Figura 8. Alteração de cor dos filmes em diferentes soluções de pH

A Figura 8 apresenta a alteração de cor dos filmes elaborados com diferentes concentrações e condições de processamento do PLDB quando expostos a soluções tampão com valores de pH variando de 2 a 10. O filme controle (Filme 1), composto apenas pela matriz de amido e CMC, não apresentou alterações visuais significativas ao longo da faixa de pH avaliada, mantendo coloração esbranquiçada.

Nos filmes contendo PLDB (Filmes 2 a 9), verificou-se uma mudança gradual de coloração em função do aumento do pH. Em meio fortemente ácido (pH 2), predominou a coloração rosa-avermelhada, especialmente nos filmes com maior concentração de PLDB (Filmes 3, 5, 7 e 9), indicando maior intensidade cromática devido ao maior teor de antocianinas

incorporadas à matriz polimérica. À medida que o pH aumentou para valores próximos de 4, observou-se uma redução da intensidade do rosa, seguida pela formação de tonalidades arroxeadas ou acinzentadas em pH 6.

Em meio alcalino (pH 8 e 10), os filmes apresentaram tonalidades esverdeadas e acinzentadas, sendo essa transição mais evidente nos Filmes 2 e 3, formulados com partículas de PLDB moídas a 740 μm . O Filme 3 (4 g de PLDB) destacou-se pela maior amplitude de variação visual entre os diferentes valores de pH, apresentando coloração rosa intensa em pH ácido e tonalidade verde perceptível em pH 10. Esse comportamento sugere que o aumento da concentração de PLDB favoreceu a incorporação de antocianinas na matriz, resultando em maior sensibilidade colorimétrica.

A influência do tamanho da partícula também pode ser observada ao comparar os Filmes 2 e 3 com os Filmes 4 e 5. Embora todos tenham apresentado resposta ao pH, os filmes produzidos com partículas menores (125 μm) exibiram coloração mais homogênea e menor presença de pontos pigmentados, indicando melhor dispersão do PLDB na matriz filmogênica. Essa distribuição mais uniforme pode favorecer a visualização da mudança de cor e aumentar a eficiência do sistema indicador.

Além disso, os tratamentos submetidos à sonicação (Filmes 6 a 9) apresentaram aspecto visual mais uniforme quando comparados aos respectivos filmes sem sonicação. A sonicação promove a desagregação de partículas e melhora a dispersão dos compostos bioativos (REF) na solução filmogênica, o que pode explicar a maior homogeneidade observada. Entretanto, a intensidade da resposta colorimétrica permaneceu diretamente relacionada à concentração de PLDB, sendo mais pronunciada nos filmes contendo 4 g do material (Filmes 7 e 9).

Resultados semelhantes foram relatados por Silva et al. (2023), que observaram mudanças de coloração de filmes biodegradáveis incorporados com antocianinas de batata-doce roxa ao longo de uma ampla faixa de pH, atribuindo essas alterações às diferentes formas estruturais assumidas pelas antocianinas em resposta às condições do meio.

3.9 Caracterização físicas e químicas dos filmes

A Tabela 12 apresenta os valores médios de espessura dos filmes desenvolvidos.

Tabela 13. Espessura dos diferentes filmes

Formulação	Espessura (mm)
Filme 1	$0,10 \pm 0,02^e$
Filme 2	$0,11 \pm 0,01^e$
Filme 3	$0,17 \pm 0,01^{cd}$

Filme 4	$0,20 \pm 0,01^{ab}$
Filme 5	$0,12 \pm 0,01^e$
Filme 6	$0,21 \pm 0,01^{ab}$
Filme 7	$0,22 \pm 0,01^a$
Filme 8	$0,17 \pm 0,02^{cd}$
Filme 9	$0,18 \pm 0,01^{bc}$

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os filmes apresentaram espessuras variando de 0,1 a 0,22 mm. Observou-se que a adição do PLBD promoveu aumento da espessura dos filmes quando comparados ao controle, sendo esse comportamento mais pronunciado nas formulações contendo maior concentração do pó. Esse resultado pode ser atribuído ao aumento da quantidade de sólidos na solução filmogênica, o que favorece a formação de uma matriz mais espessa durante a secagem.

A morfologia dos filmes foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo micrografias obtidas nas ampliações de 1000x, 2000x e 5000x apresentadas na Figura 9.

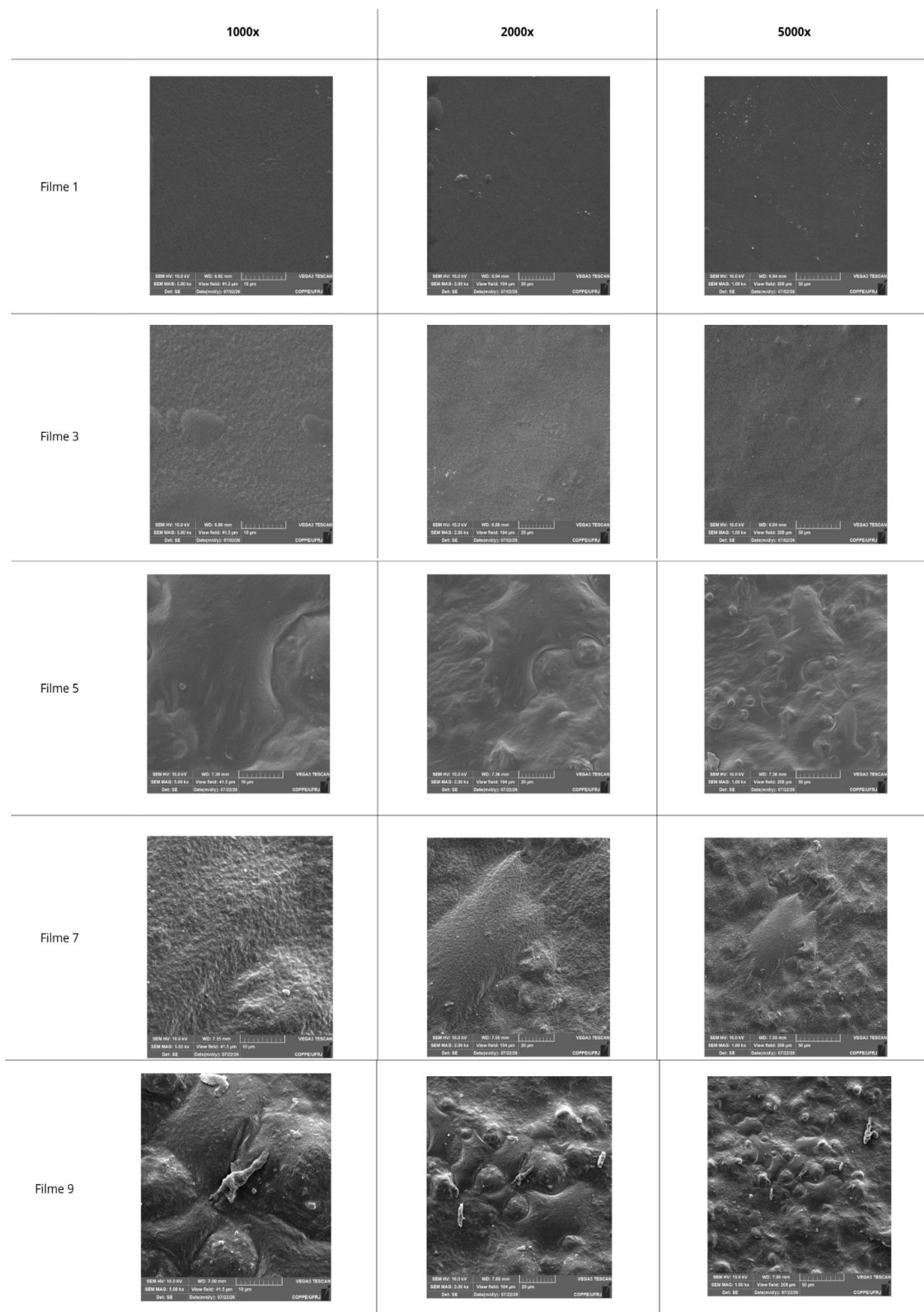


Figura 9. MEV dos Filmes 1, 3, 5, 7 e 9

Observou-se que a composição da formulação exerceu influência direta sobre a organização da estrutura da matriz polimérica.

O Filme 1 apresentou superfície predominantemente lisa, homogênea e contínua.

Mesmo com a ampliação de 5000x, a matriz permaneceu uniforme, indicando boa miscibilidade entre o amido, CMC e glicerol, sugerindo que não houve separação de fases ou aglomeração dos componentes.

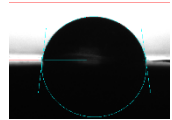
Com a incorporação do PLBD, ocorreram alterações na superfície, com o aparecimento de irregularidades e estruturas salientes ao longo da matriz. Essas modificações podem estar relacionadas às características do pó, como a presença de antocianinas, amido, fibras e entre outros. Resultados semelhantes foram observados por Luchese et al. (2017), que verificaram um aumento moderado da rugosidade superficial após a incorporação de resíduos vegetais ricos em compostos fenólicos em filmes de CMC.

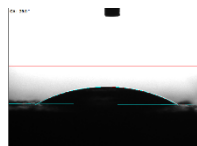
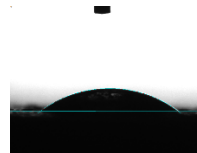
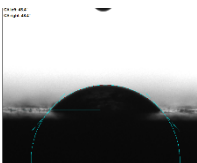
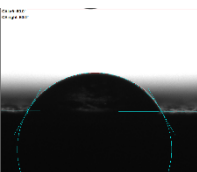
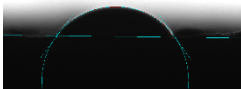
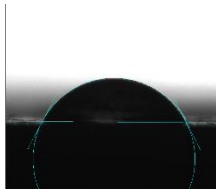
Apesar das rugosidades, não foram observadas fissuras, indicando que a integridade estrutural da matriz foi preservada.

O Filme 9 apresentou a superfície mais heterogênea e rugosa. Esse comportamento sugere que a combinação da redução do tamanho das partículas do PLBD ao passar pela sonicação, favoreceu maior interação entre os constituintes.

A Tabela 14 apresenta os resultados de ângulo de contato para os filmes analisados. A análise dos ângulos de contato dos filmes à base de amido e CMC contendo diferentes concentrações de PLBD evidenciou que a incorporação do pó, bem como os tratamentos aplicados às partículas, influenciaram significativamente a mudança de molhabilidade dos filmes. O filme controle (Filme 1) apresentou o maior ângulo de contato ($88,37^\circ \pm 6,22$), diferindo estatisticamente das demais formulações ($p < 0,05$). Esse valor, próximo a 90° , indica menor molhabilidade superficial e reduzida afinidade com a água, comportamento que pode estar relacionado à organização da matriz polimérica formada por amido e CMC, na qual parte dos grupos hidroxila encontra-se envolvida em interações intermoleculares, limitando sua disponibilidade para interação com moléculas de água. Valores nessa faixa são característicos de superfícies com menor capacidade de espalhamento da gota e menor interação com o líquido (Lauer et al., 2020; Wilpiszewska et al., 2020).

Tabela 14. Ângulo de contato dos diferentes filmes

Formulação	Ângulo de contato ($^\circ$)	Fotos
Filme 1	$88,37 \pm 6,22^a$	

Filme 2	$41,57 \pm 2,10^d$	
Filme 3	$51,70 \pm 5,54^c$	
Filme 4	$50,10 \pm 1,49^c$	
Filme 5	$53,57 \pm 1,24^c$	
Filme 6	$52,70 \pm 1,93^c$	
Filme 7	$55,53 \pm 2,84^c$	
Filme 8	$66,63 \pm 0,93^b$	
Filme 9	$70,07 \pm 1,53^b$	

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

A incorporação de 2g de PLBD moído promoveu redução significativa do ângulo de contato para $41,57^\circ \pm 2,10$ (Filme 2), resultando na formulação com maior molhabilidade superficial entre os filmes contendo o resíduo. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de compostos hidrofílicos no PLBD, incluindo carboidratos, fibras e compostos

fenólicos, que aumentam a disponibilidade de grupos polares capazes de interagir com moléculas de água por meio de ligações de hidrogênio. O aumento da concentração para 4g (Filme 3) elevou o ângulo de contato para $51,70^\circ \pm 5,54$, embora os valores tenham permanecido significativamente inferiores aos observados para o controle. Esse resultado sugere que concentrações mais elevadas do resíduo podem favorecer interações intermoleculares e alterações estruturais capazes de reduzir parcialmente a exposição de grupos hidrofílicos na superfície (Liu et al., 2021; Chen et al., 2020; Vieira et al., 2026).

Comportamento semelhante foi observado para os filmes produzidos com PLBD submetido à segunda condição de processamento (Filmes 4 e 5), que apresentaram ângulos de contato de $50,10^\circ \pm 1,49$ e $53,57^\circ \pm 1,24$, respectivamente. Os valores próximos aos observados para os filmes 3, 6 e 7 indicam que a concentração do resíduo exerceu influência mais pronunciada sobre a molhabilidade superficial do que as diferenças de processamento das partículas. Em todos esses casos, os ângulos de contato permaneceram substancialmente inferiores aos observados para o filme controle, evidenciando aumento da hidrofiliabilidade da superfície.

Os filmes produzidos com partículas submetidas à sonicação apresentaram comportamento distinto. Os filmes 6 e 7 exibiram ângulos de contato de $52,70^\circ \pm 1,93$ e $55,53^\circ \pm 2,84$, respectivamente, valores ligeiramente superiores aos observados para os respectivos tratamentos não sonificados. O efeito da sonicação foi ainda mais evidente nos Filmes 8 e 9, que apresentaram ângulos de contato de $66,63 \pm 0,93^\circ$ e $70,07 \pm 1,53^\circ$, respectivamente, constituindo os maiores valores entre as formulações contendo PLBD. Esses resultados sugerem que a sonicação favoreceu uma dispersão mais homogênea das partículas na matriz polimérica, promovendo maior compactação estrutural e reduzindo a exposição de grupos hidrofílicos na superfície do material. Consequentemente, observou-se aumento da hidrofobicidade relativa dos filmes, refletido pelos maiores ângulos de contato (Chen et al., 2020; Vieira et al., 2026).

De modo geral, os resultados demonstram que a incorporação de PLBD aumentou a hidrofiliabilidade dos filmes em comparação ao controle, evidenciada pela redução dos ângulos de contato. Entretanto, a concentração do resíduo e os tratamentos aplicados às partículas influenciaram significativamente esse comportamento. Enquanto os filmes contendo PLBD não sonificado apresentaram ângulos de contato entre $41,57^\circ$ e $55,53^\circ$, os tratamentos sonificados resultaram em valores mais elevados, alcançando $70,07^\circ$ no Filme 9. O teste de Tukey revelou diferenças significativas entre as formulações ($p < 0,05$), indicando que as modificações promovidas pela adição e processamento do PLBD exerceram influência direta sobre as

propriedades de superfície do material. Essas alterações podem impactar a interação dos filmes com a umidade, a absorção de água e o desempenho em aplicações como embalagens biodegradáveis e inteligentes, nas quais as propriedades superficiais desempenham papel fundamental na estabilidade e funcionalidade do sistema (Vieira et al., 2011; Mali et al., 2005; Lauer et al., 2020; Vieira et al., 2026).

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para identificar os principais grupos funcionais presentes nos filmes e avaliar possíveis alterações estruturais decorrentes da incorporação do PLBD e das diferentes condições de processamento. Os espectros obtidos para os nove filmes apresentaram perfis semelhantes, sem o surgimento de novas bandas ou deslocamentos significativos dos picos característicos da matriz polimérica, indicando que tanto a incorporação do PLBD quanto às modificações na granulometria e a aplicação de sonicação não promoveram alterações químicas expressivas na estrutura dos filmes. Esse comportamento sugere que as interações entre os componentes ocorreram predominantemente por meio de ligações de hidrogênio e outras interações intermoleculares. Os espectros de absorção na região do infravermelho estão apresentados na Figura 10 e 11.

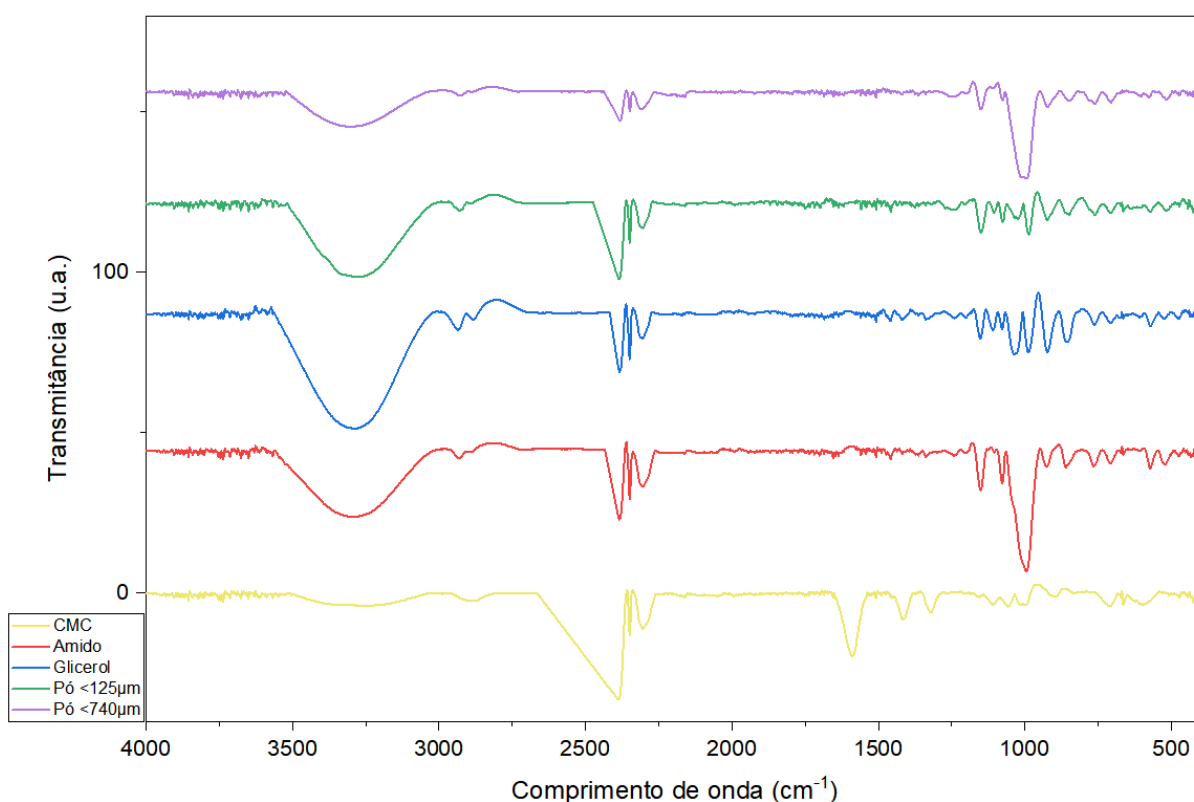


Figura 10. Espectros de FTIR para os componentes do filme

Todos os filmes apresentaram uma banda larga entre 3316 e 3326 cm^{-1} , atribuída ao

estiramento dos grupos hidroxila (O–H) presentes no amido, na CMC, no glicerol e nos compostos fenólicos das antocianinas. A elevada intensidade dessa banda evidencia a presença de uma extensa rede de ligações de hidrogênio, característica de matrizes biodegradáveis à base de biopolímeros (PEREIRA, 2017; GARNICA-PALAFOX e SÁNCHEZ-ARÉVALO, 2016; RAJ e SHANKARAN, 2016).

Pequenas variações na intensidade e no formato dessa banda podem estar relacionadas à reorganização das ligações de hidrogênio promovida pela incorporação do PLBD. As antocianinas apresentam múltiplos grupos hidroxila capazes de interagir com os grupos hidroxila do amido e da carboximetilcelulose, favorecendo a compatibilidade entre os componentes da matriz sem promover alterações químicas significativas (HUSSIN et al., 2016). Comportamento semelhante foi observado por Pereira (2017), que relatou modificações discretas na região de aproximadamente 3300 cm^{-1} em filmes contendo compostos bioativos, atribuídas ao rearranjo das ligações de hidrogênio.

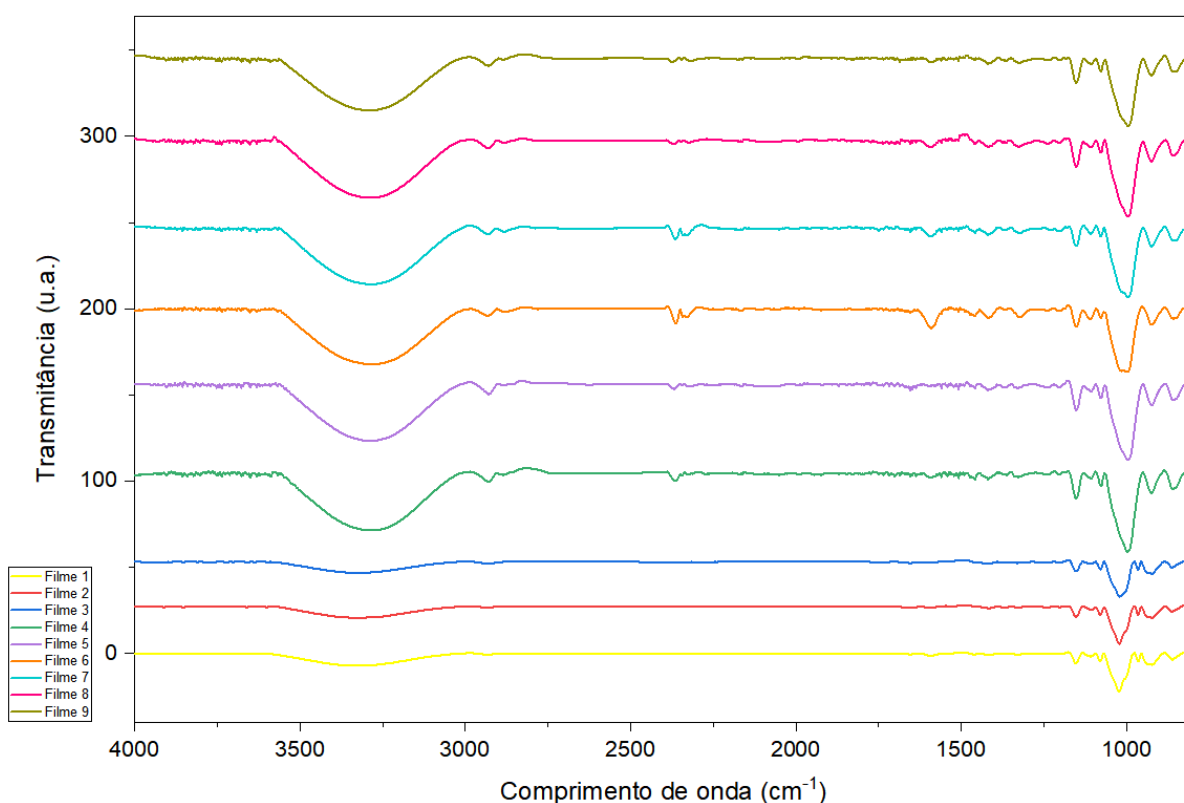


Figura 11. Espectros de FTIR para os filmes com diferentes formulações

Nos filmes produzidos com diferentes granulometrias do PLBD e submetidos à sonicação, observaram-se apenas discretas diferenças na intensidade dessa banda, sem deslocamentos relevantes do número de onda. Essas variações sugerem que a redução do tamanho das partículas e a sonicação favoreceram uma distribuição mais homogênea do PLBD

na matriz polimérica, aumentando a interação física entre os componentes, mas sem alterar sua estrutura química. Esse comportamento é consistente com a ação da sonicação, que promove maior dispersão das partículas e reduz a formação de aglomerados, favorecendo o estabelecimento de ligações de hidrogênio entre os constituintes da matriz (RAJ e SHANKARAN, 2016; HUSSIN et al., 2016).

As bandas observadas na região de 2920–2930 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento assimétrico das ligações C–H dos grupos alifáticos presentes nos polissacarídeos e no plastificante. Na região entre 1600 e 1650 cm^{-1} observam-se bandas associadas à deformação angular da água adsorvida e às vibrações de grupos funcionais presentes nos constituintes da matriz. A manutenção dessas bandas em todas as formulações reforça a estabilidade estrutural dos filmes após a incorporação do PLBD e demonstra que as diferentes condições de processamento não modificaram significativamente a composição química da matriz.

Na região de 1330–1340 cm^{-1} foram observadas bandas relacionadas às vibrações de deformação das ligações C–H e O–H, cuja intensidade apresentou pequenas variações entre as formulações. Essas diferenças podem estar associadas às interações intermoleculares estabelecidas entre os compostos fenólicos presentes no PLBD e a matriz polimérica (SHANKAR e RHIM, 2016). Nos filmes obtidos com partículas mais finas e submetidos à sonicação, essas bandas apresentaram perfil ligeiramente mais definido, sugerindo melhor dispersão dos compostos fenólicos ao longo da matriz filmogênica.

A região entre 1150 e 900 cm^{-1} apresentou as bandas mais intensas dos espectros, atribuídas ao estiramento das ligações C–O–C e C–O características dos polissacarídeos. A preservação dessas bandas em todas as formulações demonstra que a estrutura principal da matriz à base de amido e CMC foi mantida após a incorporação do PLBD. Nos Filmes 7, 8 e 9 observou-se ligeiro aumento da definição dessas bandas, o que pode estar relacionado à maior homogeneidade estrutural promovida pela redução do tamanho das partículas e pela sonicação, favorecendo uma distribuição mais uniforme do PLBD na matriz sem alterar sua organização química (PEREIRA, 2017; SHANKAR e RHIM, 2016).

De modo geral, os resultados de FTIR indicam que a incorporação do PLBD, independentemente da granulometria utilizada e da aplicação de sonicação, não promoveu alterações químicas significativas na matriz filmogênica, mas favorece interações intermoleculares entre os componentes, especialmente por meio de ligações de hidrogênio. As pequenas diferenças observadas entre os espectros refletem principalmente modificações de natureza física relacionadas à dispersão do PLBD e à reorganização da rede de ligações de hidrogênio. Esse comportamento evidencia a boa compatibilidade entre o PLBD e a matriz

polimérica, contribuindo para a formação de filmes estruturalmente homogêneos e estáveis. A Figura 10 apresenta os espectros de FTIR dos principais componentes utilizados na produção dos filmes (CMC, amido e glicerol), bem como do pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa (PLBD) obtido em duas granulometrias ($<125\ \mu\text{m}$ e $<740\ \mu\text{m}$). Os espectros do PLBD apresentaram bandas características de materiais ricos em polissacarídeos e compostos fenólicos, sendo observadas diferenças discretas entre as duas granulometrias.

Ambas as amostras apresentaram uma banda larga entre 3200 e $3400\ \text{cm}^{-1}$, atribuída ao estiramento dos grupos hidroxila (O–H), característicos dos carboidratos, antocianinas e demais compostos fenólicos presentes na batata-doce de polpa roxa. Essa banda é típica de materiais vegetais e reflete a elevada capacidade de formação de ligações de hidrogênio (PEREIRA, 2017; GARNICA-PALAFOX e SÁNCHEZ-ARÉVALO, 2016).

As bandas observadas entre 2920 e $2930\ \text{cm}^{-1}$ são atribuídas ao estiramento das ligações C–H de grupos alifáticos presentes principalmente no amido e em outros constituintes da parede celular vegetal. Já a região entre 1600 e $1650\ \text{cm}^{-1}$ está relacionada à deformação angular da água adsorvida e às vibrações de grupos carbonila presentes em compostos fenólicos e outros constituintes do PLBD.

Diferenças mais evidentes foram observadas na região compreendida entre 1200 e $900\ \text{cm}^{-1}$, correspondente às vibrações das ligações C–O, C–O–C e C–C, características dos carboidratos e do amido. O PLBD com granulometria inferior a $125\ \mu\text{m}$ apresentou bandas mais intensas e melhor definidas nessa região quando comparado ao material de granulometria inferior a $740\ \mu\text{m}$, sugerindo maior exposição dos grupos funcionais devido à redução do tamanho das partículas. A diminuição da granulometria aumenta a área superficial específica do material, favorecendo maior interação entre seus constituintes e a radiação infravermelha, além de proporcionar maior disponibilidade dos grupos hidroxila para interação com a matriz polimérica (RAJ e SHANKARAN, 2016).

Esses resultados corroboram os obtidos na caracterização dos filmes, nos quais as formulações produzidas com partículas menores apresentaram melhor homogeneidade e maior eficiência na resposta colorimétrica. A maior área superficial proporcionada pela redução da granulometria favorece a dispersão do PLBD na solução filmogênica e aumenta a interação intermolecular entre o amido, a carboximetilcelulose e os compostos fenólicos, contribuindo para a obtenção de filmes estruturalmente mais uniformes e com melhor desempenho funcional.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica dos filmes biodegradáveis desenvolvidos. De maneira geral, todas as formulações apresentaram comportamento semelhante, com perda de massa ocorrendo em

diferentes etapas ao longo do aquecimento, característica típica de materiais biodegradáveis à base de amido (Mali et al., 2006; Sanyang et al., 2016).

Inicialmente, entre aproximadamente 30 e 120 °C, foi observada uma pequena perda de massa em todas as amostras, atribuída à evaporação da água adsorvida na matriz polimérica. Esse comportamento é esperado em filmes produzidos a partir de polissacarídeos, devido ao caráter hidrofílico desses materiais (Sanyang et al., 2016).

A principal perda de massa ocorreu entre aproximadamente 250 e 320 °C, faixa de temperatura associada à degradação da matriz polimérica. Esse comportamento indica que os filmes apresentam boa estabilidade térmica, uma vez que sua decomposição ocorre em temperaturas muito superiores às normalmente encontradas durante o processamento, armazenamento e utilização de embalagens para alimentos (Mali et al., 2006).

As diferentes formulações apresentaram perfis de degradação bastante semelhantes, indicando que a incorporação do pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa, bem como as alterações de granulometria e a aplicação da sonicação, não promoveram mudanças expressivas na estabilidade térmica da matriz. As principais diferenças observadas referem-se à quantidade de resíduo remanescente ao final do ensaio, sugerindo pequenas variações na composição e na resistência térmica entre as formulações, conforme apresentado na Figura 12.

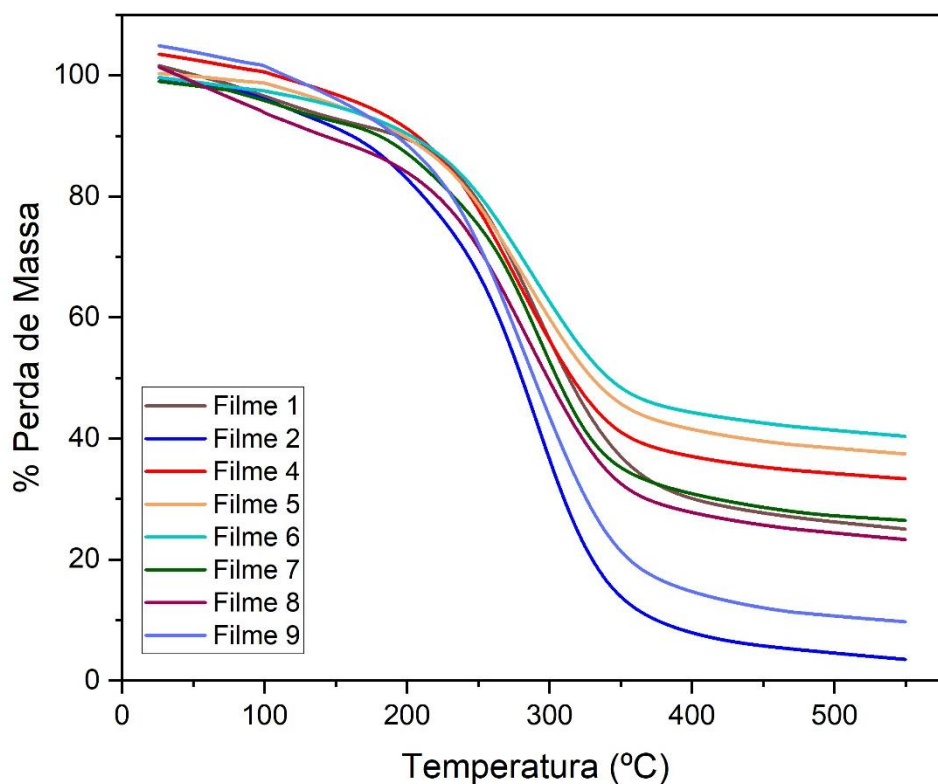


Figura 12. TGA dos filmes

As curvas termogravimétricas dos componentes utilizados na formulação dos filmes

estão apresentadas na Figura 13. Todos os materiais apresentaram uma pequena perda de massa nas temperaturas iniciais (até aproximadamente 120 °C), atribuída principalmente à evaporação da água adsorvida. Em seguida, observaram-se diferentes perfis de degradação térmica de acordo com a natureza de cada componente.

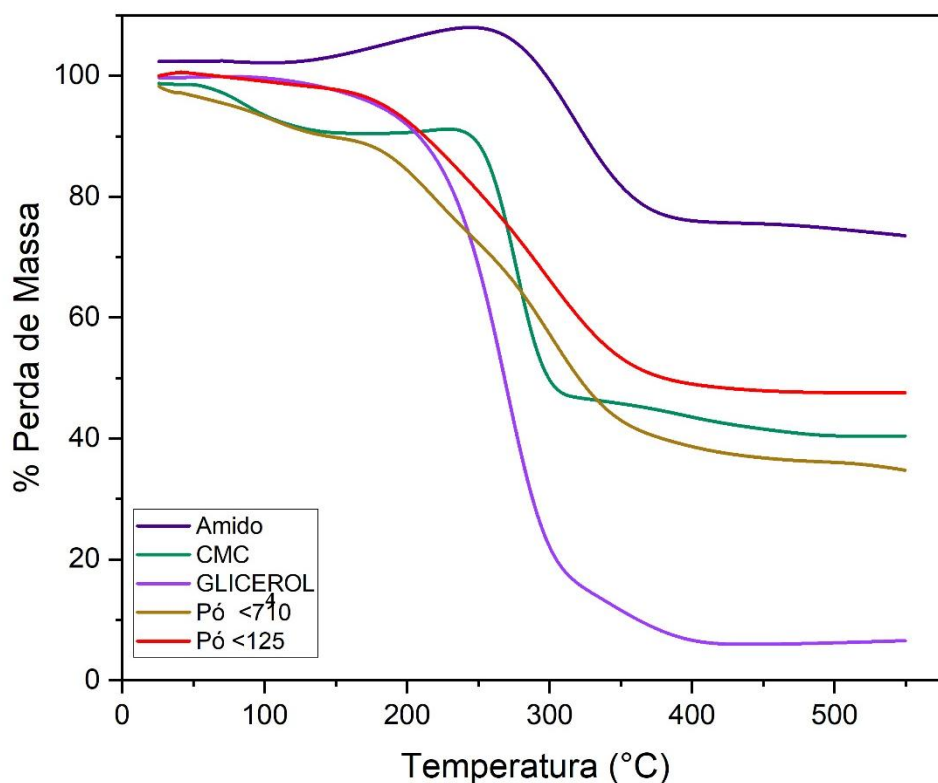


Figura 13. TGA dos componentes dos filmes

As curvas dos componentes isolados evidenciaram comportamentos distintos. O glicerol apresentou a maior perda de massa entre aproximadamente 220 e 300 °C, comportamento compatível com sua menor estabilidade térmica e elevada volatilidade. O amido e a carboximetilcelulose apresentaram degradação predominante entre aproximadamente 280 e 330 °C, enquanto as amostras de pó de batata-doce de polpa roxa (<125 µm e <710 µm) apresentaram perfis bastante semelhantes entre si, indicando que a redução da granulometria não promoveu alterações significativas em seu comportamento térmico. Esses resultados demonstram que o PLBD apresenta estabilidade suficiente para suportar as condições empregadas durante a produção dos filmes.

As curvas de DSC dos componentes e das formulações estão apresentadas nas Figuras 14 e 15. Os componentes isolados apresentaram perfis térmicos distintos, refletindo suas diferentes características estruturais. Entre eles, o glicerol apresentou o evento térmico mais intenso, enquanto o amido, a CMC e o PLBD exibiram transições de menor intensidade

distribuídas ao longo da faixa de temperatura avaliada.

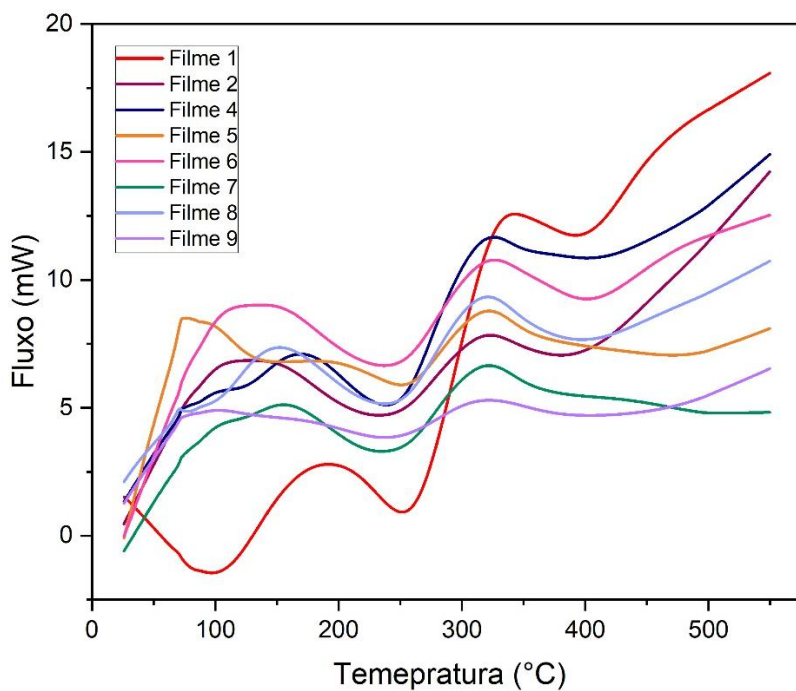


Figura 14. DSC dos filmes

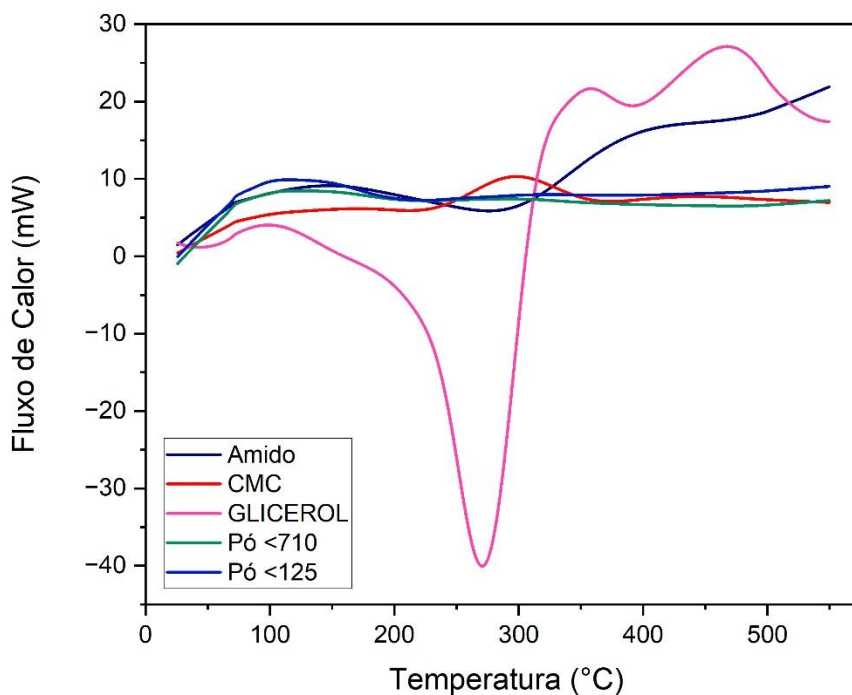


Figura 15. DSC dos componentes

Após a formação dos filmes, observou-se alteração no perfil térmico em relação aos componentes isolados, evidenciando a interação entre os constituintes da matriz filmogênica. Entretanto, não foram observados novos eventos térmicos de grande intensidade nem deslocamentos expressivos das transições térmicas, indicando que a incorporação do PLBD ocorreu predominantemente por interações físicas, principalmente ligações de hidrogênio entre

o amido, a CMC, o glicerol e os compostos presentes no pó de batata-doce de polpa roxa. Esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos por FTIR, que também não evidenciaram a formação de novos grupos funcionais.

Os filmes apresentaram perfis de DSC semelhantes entre si, independentemente da granulometria, concentração do PLBD ou aplicação da sonicação. As pequenas diferenças observadas na intensidade dos eventos térmicos podem estar relacionadas às modificações na organização da matriz polimérica e à distribuição dos componentes na estrutura do filme, sem comprometer sua estabilidade térmica.

De modo geral, as análises de TGA e DSC demonstraram que a incorporação do pó liofilizado de batata-doce de polpa roxa não alterou significativamente o comportamento térmico da matriz filmogênica, indicando que os filmes desenvolvidos apresentam estabilidade térmica adequada para a aplicação proposta.

3.10 Caracterização mecânica dos filmes

Os resultados das propriedades mecânicas dos filmes estão apresentados na Tabela 15. Foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) para todos os parâmetros avaliados, indicando que as diferentes formulações influenciaram diretamente o comportamento mecânico dos filmes.

Tabela 15. Caracterização Mecânica

Amostra	Fmax	Elongation (mm)	Elongation at break (%)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Filme 1	13,993 ^a	17,649 ^b	58,831 ^b	4,399 ^a	37,336 ^a
Filme 2	5,563 ^b	20,062 ^a	66,873 ^a	1,550 ^c	3,552 ^d
Filme 3	14,578 ^a	17,349 ^b	57,829 ^b	3,125 ^b	14,130 ^c
Filme 4	3,777 ^b	23,982 ^a	79,941 ^a	1,153 ^c	2,942 ^d
Filme 5	13,299 ^a	21,075 ^a	70,248 ^a	3,204 ^b	15,165 ^c
Filme 6	3,470 ^b	11,444 ^c	38,145 ^c	1,026 ^c	4,387 ^d
Filme 7	4,476 ^b	3,929 ^d	13,095 ^d	0,909 ^c	9,724 ^c
Filme 8	4,258 ^b	23,732 ^a	79,107 ^a	1,271 ^c	2,621 ^d
Filme 9	14,309 ^a	14,309 ^b	47,698 ^b	3,641 ^a	21,459 ^b

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Os Filmes 1, 3, 5 e 9 apresentaram os maiores valores de força máxima (F_{max}) e resistência à tração, demonstrando maior capacidade de suportar esforços mecânicos antes da ruptura. Entre eles, o Filme 9 destacou-se por apresentar elevada resistência mecânica (3,64 MPa) associada a um módulo de Young intermediário (21,46 MPa), indicando um material resistente, porém menos rígido que o filme controle. Em contrapartida, os Filmes 2, 4, 6, 7 e 8 apresentaram menores valores de força máxima e resistência à tração, refletindo uma estrutura menos resistente.

Em relação à elongação na ruptura, os Filmes 4 e 8 apresentaram os maiores valores (79,94 e 79,11%, respectivamente), evidenciando maior capacidade de deformação antes da ruptura. Por outro lado, o Filme 7 apresentou a menor elongação (13,10%), indicando comportamento mais frágil, embora tenha apresentado elevada resposta colorimétrica nas avaliações posteriores. Esses resultados demonstram que o desempenho mecânico e a eficiência como indicador colorimétrico não estão necessariamente relacionados.

O filme controle (Filme 1) apresentou o maior módulo de Young (37,34 MPa), caracterizando uma matriz mais rígida e com menor capacidade de deformação. A incorporação do pó de batata-doce de polpa roxa reduziu esse parâmetro na maioria das formulações, indicando que a presença do material vegetal modificou as interações intermoleculares da matriz polimérica e reduziu sua rigidez.

A relação inversa observada entre resistência mecânica e elongação é característica de materiais poliméricos, uma vez que matrizes mais rígidas apresentam maior resistência à deformação, porém menor capacidade de alongamento antes da ruptura. Além disso, a espessura dos filmes não foi o único fator responsável pelo comportamento mecânico, indicando que a distribuição das partículas de pó de batata-doce e as interações entre amido, carboximetilcelulose e glicerol exerceram maior influência sobre essas propriedades.

Resultados semelhantes foram observados por Pelissari *et al.* (2013), que relataram influência da composição da matriz polimérica e da concentração de plastificantes sobre a resistência mecânica e a elongação de filmes à base de amido. Luchese *et al.* (2018) também verificaram que a incorporação de compostos naturais altera as interações intermoleculares da matriz, modificando suas propriedades mecânicas.

De forma geral, as diferentes formulações permitiram obter filmes com distintos níveis de resistência, rigidez e flexibilidade. Considerando conjuntamente as propriedades mecânicas, a integridade estrutural observada na avaliação macroscópica e a resposta colorimétrica, o

Filme 9 apresentou o conjunto mais equilibrado de características para aplicação como filme inteligente.

3.11 Biodegradabilidade

Os filmes apresentaram rápida desintegração durante o teste de enterramento em solo. Ao longo do período experimental, foi observada perda progressiva da integridade estrutural, caracterizada pela fragmentação e redução do tamanho das amostras. Após cinco dias de incubação, os filmes não puderam mais ser visualmente recuperados do solo. Esse comportamento evidencia a elevada suscetibilidade da matriz polimérica à degradação em ambiente natural, indicando o potencial biodegradável dos filmes desenvolvidos. A rápida desintegração pode ser atribuída à composição da matriz filmogênica, constituída predominantemente por amido, carboximetilcelulose e glicerol, materiais hidrofílicos que favorecem a absorção de água e a ação de microrganismos presentes no solo. Essas características aceleram a degradação da estrutura polimérica, tornando o material uma alternativa ambientalmente mais sustentável em comparação aos polímeros sintéticos convencionais.

3.12 Curva modelo de alteração do pH do leite bovino e caprino

A Figura 16 apresenta a resposta colorimétrica dos filmes indicadores selecionados quando expostos ao leite bovino e caprino previamente ajustados para diferentes valores de pH. De maneira geral, observou-se que os filmes responderam às variações de pH por meio de alterações graduais de cor, evidenciando o potencial das antocianinas presentes no PLBD como indicadores visuais de mudanças na acidez do leite.

Nos meios mais ácidos (pH 3,5 e 4,5), os filmes apresentaram tonalidades rosadas mais intensas, especialmente no leite caprino. Esse comportamento está associado à predominância da forma de cátion flavílio das antocianinas, responsável pelas colorações vermelha e rosa em condições ácidas. À medida que o pH aumentou para valores próximos da neutralidade (pH 5,5 e 6,5), observou-se redução da intensidade da coloração rosa e o surgimento de tonalidades acinzentadas ou levemente arroxeadas.

Em condições mais alcalinas (pH 7,5 e 8,0), as alterações de cor tornaram-se mais evidentes, principalmente nos filmes submetidos à sonicação. Nesses tratamentos, verificou-se a formação de tonalidades acinzentadas e esverdeadas, resultado das transformações estruturais das antocianinas para formas quinoidais e aniônicas. Essas mudanças corroboram os resultados observados anteriormente nos ensaios realizados em soluções tampão, demonstrando que os

filmes mantiveram sua sensibilidade colorimétrica mesmo quando aplicados em uma matriz alimentar mais complexa.

Ao comparar os dois tipos de leite, observa-se que os filmes apresentaram comportamento semelhante, embora as alterações de cor tenham sido visualmente mais perceptíveis no leite caprino em alguns valores de pH. Esse resultado pode estar relacionado às diferenças na composição físico-química entre os leites, incluindo teor de gordura, proteínas e minerais, que podem influenciar a interação da luz com a superfície dos filmes e a percepção visual da cor.

Entre as formulações avaliadas, os filmes contendo 4 g de PLBD apresentaram maior intensidade cromática e melhor definição das mudanças de cor ao longo da faixa de pH estudada. Além disso, os filmes produzidos com aplicação de sonicação mostraram coloração mais uniforme, indicando melhor dispersão das partículas de PLBD na matriz polimérica. Esses resultados reforçam a importância da concentração do pigmento e da homogeneização da dispersão para o desenvolvimento de filmes indicadores mais eficientes.



G2% = Filme 2; G4% = Filme 3; M2% = Filme 4; M4% = Filme 5; SONI G2% = Filme 6; SONI G4% = Filme 7; SONI M2% = Filme 8; SONI M4% = Filme 9.

**Imagens com contraste otimizado para melhor visualização*

Figura 16. Aplicação dos filmes em leites bovino e caprino reconstituídos

3.13 Aplicação prática dos filmes para o monitoramento do pH do leite bovino

Considerando os resultados da avaliação macroscópica, os filmes contendo 4 g de PLDB apresentaram melhor integridade estrutural e maior intensidade de cor quando comparados às formulações contendo 2 g. Entre essas formulações, os Filmes 3, 5, 7 e 9 foram selecionados para a aplicação em leite bovino, uma vez que apresentaram melhor resposta colorimétrica e maior potencial para utilização como indicadores de pH.

A resposta colorimétrica dos filmes frente às amostras de leite provenientes de animais sadios, com mastite subclínica e mastite clínica está apresentada na Tabela 16. Todos os filmes responderam às alterações de pH do leite por meio de mudanças visíveis de cor, evidenciando a sensibilidade das formulações às diferentes condições avaliadas. As amostras de leite de animais sadios (pH 6,55) mantiveram coloração semelhante à inicial dos filmes, enquanto as amostras provenientes de animais com mastite apresentaram alterações mais pronunciadas.

Tabela 16. Resposta colorimétrica dos filmes inteligentes em amostras de leite bovino provenientes de animais sadios, com mastite subclínica e mastite clínica.

Sanidade	pH	Filme 3	Filme 5	Filme 7	Filme 9
Animais sadios	6,55				
Animais com mastite subclínica	5,30				
Animais com mastite clínica	7,89				

A Tabela 16 apresenta a resposta colorimétrica dos Filmes 3, 5, 7 e 9 quando expostos a amostras de leite bovino provenientes de animais sadios, com mastite subclínica e mastite clínica. Todos os filmes responderam às alterações do pH do leite, evidenciando a sensibilidade das formulações às diferentes condições avaliadas. Entretanto, a intensidade da resposta colorimétrica variou entre os filmes.

As amostras de leite provenientes de animais sadios (pH 6,55) mantiveram coloração semelhante à original dos filmes. Já o leite de animais com mastite subclínica (pH 5,30) promoveu alterações discretas de cor, enquanto as amostras de leite com mastite clínica (pH 7,89) produziram mudanças mais pronunciadas, principalmente nos filmes com maior concentração de PLDB. Esse comportamento está relacionado à elevada sensibilidade das

antocianinas às variações de pH, que promovem modificações estruturais responsáveis pelas alterações de cor observadas.

Entre as formulações avaliadas, o Filme 7 apresentou a resposta colorimétrica mais evidente, permitindo maior contraste visual entre as três condições de sanidade do leite. A mudança para uma tonalidade esverdeada na presença de leite proveniente de animais com mastite clínica facilitou a diferenciação das amostras quando comparada aos demais filmes. Os Filmes 3, 5 e 9 também apresentaram alterações de cor, porém com menor intensidade e contraste visual. Esses resultados indicam que o Filme 7 possui maior potencial para aplicação como indicador colorimétrico no monitoramento da qualidade do leite bovino.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a batata-doce de polpa roxa constitui uma matéria-prima promissora para o desenvolvimento de filmes inteligentes biodegradáveis destinados ao monitoramento da qualidade de alimentos. O processo de liofilização foi eficiente na preservação das características do material, resultando em um pó com baixo teor de umidade e elevado conteúdo de antocianinas, compostos responsáveis pela resposta colorimétrica observada.

A incorporação do PLBD às matrizes de amido e CMC permitiu a obtenção de filmes com boa integridade estrutural, propriedades mecânicas satisfatórias e sensibilidade às variações de pH. As mudanças de coloração observadas em diferentes meios confirmaram o potencial das antocianinas como indicadores naturais para sistemas de embalagem inteligente. Entre as formulações avaliadas, os filmes produzidos a partir do PLBD previamente submetido à sonicação apresentaram melhor homogeneidade e desempenho colorimétrico, evidenciando que esse tratamento favorece a dispersão das partículas na matriz filmogênica e melhora as propriedades do material.

Além disso, os ensaios de aplicação em leite bovino e caprino evidenciaram a capacidade dos filmes de atuarem como sensores visuais de qualidade, oferecendo uma alternativa sustentável, de baixo custo e fácil interpretação para o monitoramento do frescor dos alimentos. O Filme 7 apresentou a resposta colorimétrica mais expressiva na diferenciação entre amostras de leite saudável e com mastite, demonstrando elevado potencial para aplicação como indicador visual.

Dessa forma, os filmes desenvolvidos apresentam potencial para contribuir simultaneamente para a segurança alimentar, a redução do desperdício de alimentos e a diminuição dos impactos ambientais associados às embalagens convencionais. Os resultados

também indicam que a sonicação do PLBD antes de sua incorporação à solução filmogênica constitui uma etapa importante do processo de produção, promovendo melhor dispersão do pó e contribuindo para a obtenção de filmes com propriedades estruturais e funcionais superiores, devendo ser considerada em estudos futuros e na padronização da metodologia de fabricação.

REFERÊNCIAS

- ABEDI-FIROOZJAH, Reza et al. Aplicação de antocianinas de repolho roxo como pigmentos sensíveis ao pH em embalagens e sensores inteligentes para alimentos. *Polymers*, v. 14, n. 8, p. 1629, 2022.
- AHMED, Maruf; AKTER, Mst Sorifa; EUN, Jong Bang. Peeling, drying temperatures, and sulphite-treatment affect physicochemical properties and nutritional quality of sweet potato flour. *Food Chemistry*, v. 121, n. 1, p. 112–118, 2010.
- ALIZADEH-SANI, Mahmood et al. pH-responsive color indicator films based on methylcellulose/chitosan nanofiber and barberry anthocyanins for real-time monitoring of meat freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 166, p. 741-750, 2021.
- ALIZADEH-SANI, Mahmood et al. pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. *Trends in Food Science and Technology*, v. 105, n. August, p. 93–144, 2020.
- ARAÚJO, David Jefferson Cardoso; MACHADO, Ana Vera; VILARINHO, Maria Cândida Lobo Guerra. Availability and Suitability of Agroindustrial Residues as Feedstock for Cellulose-Based Materials: Brazil Case Study. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, p. 2863–2878, 2019.
- ASSEGEHEGN, Getachew et al. The Importance of Understanding the Freezing Step and Its Impact on Freeze-Drying Process Performance. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 108, n. 4, p. 1378–1395, 2019.
- AZEREDO, H. M. C.; ROSA, M. F.; MATTOSO, L. H. C. Nanocellulose in bio-based food packaging applications. *Industrial Crops and Products*, v. 97, p. 664–671, 2019.
- AZZINI, Elena; GIACOMETTI, Jasminka; RUSSO, Gian Luigi. Antiobesity Effects of Anthocyanins in Preclinical and Clinical Studies. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, v. 2017, n. ii, 2017.
- BABU, Ramesh P; O’CONNOR, Kevin; SEERAM, Ramakrishna. Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials*, v. 8, n. 2, p. 1–16, 2013.
- BAO, Yiwen et al. Novel pH sensitivity and colorimetry-enhanced anthocyanin indicator films by chondroitin sulfate co-pigmentation for shrimp freshness monitoring. *Food Control*, v. 131, n. July 2021, 2022.
- BECERRIL, Raquel; NERÍN, Cristina; SILVA, Filomena. Bring some colour to your package: Freshness indicators based on anthocyanin extracts. *Trends in Food Science and Technology*, v. 111, n. January, p. 495–505, 2021.

- BILEK, Seda Ersus; YILMAZ, Fatih Mehmet; ÖZKAN, Gülay. The effects of industrial production on black carrot concentrate quality and encapsulation of anthocyanins in whey protein hydrogels. *Food and Bioproducts Processing*, v. 102, p. 72-80, 2017.
- BRITO, G. F. *et al.* Biopolímeros, Polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 6.2, n. 5, p. 127–139, 2011.
- CAI, Dongbao *et al.* A comprehensive review on innovative and advanced stabilization approaches of anthocyanin by modifying structure and controlling environmental factors. *Food Chemistry*, v. 366, p. 130611, 2022.
- CAI, Xuran *et al.* Improvement of stability of blueberry anthocyanins by carboxymethyl starch/xanthan gum combinations microencapsulation. *Food Hydrocolloids*, v. 91, p. 238-245, 2019.
- CARVALHO, G. R. *et al.* Caprinocultura de leite no Brasil: perfil, estrutura de produção e clusters. 2019.
- CARVALHO, Renata Amorim *et al.* Encapsulação de antocianinas de juçara em emulsão dupla: avaliação de estabilidade físico-química e propriedades antioxidantes. 2024.
- CASTAÑEDA-OVANDO, Araceli *et al.* Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, v. 113, n. 4, p. 859–871, 2009.
- CHEN, Hui zhi *et al.* Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness. *Food Hydrocolloids*, v. 100, n. October 2019, p. 105438, 2020.
- CHEN, Shouhui *et al.* Interaction of plum (*prunus salicina* lindl. cv. furong) anthocyanins with Tremella polysaccharides and characteristics of their complexes. *Food Science and Technology*, v. 42, p. e37322, 2022.
- CHEN, Shunli *et al.* Development of pH indicator and antimicrobial cellulose nanofibre packaging film based on purple sweet potato anthocyanin and oregano essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 149, p. 271–280, 2020.
- CHEN, Zhongqin *et al.* Interaction characterization of preheated soy protein isolate with cyanidin-3-O-glucoside and their effects on the stability of black soybean seed coat anthocyanins extracts. *Food Chemistry*, v. 271, p. 266-273, 2019.
- CHENG, H. *et al.* Intelligent food packaging based on natural pigments: a review. *Food Chemistry*, v. 374, p. 131641, 2022.
- CHENG, Hao *et al.* Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, v. 375, n. December 2021, p. 131738, 2022.

- Cheng, M., Yan, X., Cui, Y., Han, M., Wang, Y., Wang, J., Zhang, R., & Wang, X. (2022). Characterization and release kinetics study of active packaging films based on modified starch and red cabbage anthocyanin extract. *Polymers*, 14(6), 1214.
- CHENG, Meng *et al.* Effect of dual-modified cassava starches on intelligent packaging films containing red cabbage extracts. *Food Hydrocolloids*, v. 124, n. June 2021, 2022.
- CHEONG, J. J.; AHMAD, F.; TENGKU ROZAINA, T. M. Effects of cooking methods on physicochemical properties, antioxidant properties and sensory acceptability of purple sweet potato (*Ipomoea batatas*). *Food Research*, v. 6, n. 6, p. 257–266, 2022.
- Cho TF, Yassoralipour A, Lee YY, Tang TK, Lai OM, Chong LC, Kuan CH, Phuah ET (2022) Avaliação da deterioração do leite usando um biossensor simples. *J Food Meas Charact* 16:258–268, 2022.
- CHOI, Inyoung *et al.* Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. *Food Chemistry*, v. 218, p. 122–128, 2017.
- COSTA RAMOS NETO, Kélvia Xavier; NEIVA JÚNIOR, Arnaldo Prata; DE PAIVA, Paulo Júnior Fagundes; SÁTIRO, Thaíse Mota; TAVARES, Valdir Botega. Leite de cabra: qualidade x instrução normativa nº 37/2000 do MAPA. *Extensão em Foco*, [S. l.], n. 22, 2021. DOI: 10.5380/ef.v0i22.74091. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/extensao/article/view/74091>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- DA CUNHA JÚNIOR, Paulo Cezar *et al.* Natural ingredient obtained from purple sweet potato of Family Farming (Seropédica / RJ): elaboration and characterization. *Observatorio de La Economia Latinoamericana*, p. 2698–2720, 2023.
- DALMAU, Maria Esperanza *et al.* Effects of convective drying and freeze-drying on the release of bioactive compounds from beetroot during in vitro gastric digestion. *Food & Function*, v. 10, n. 6, p. 3209–3223, 2019.
- DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L.; FENNEMA, Owen R. *Química de Alimentos de Fennema*. 4a. ed. Porto Alegre: Artimed, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://www.saraiva.com.br/quimica-de-alimentos-de-fennema-4-ed-2010-2878340.html>.
- DE CREMOUX, R., MÉNARD, J.L., BAUDRY, C. et al. Incidence des inflammations de la mamelle sur la production et la composition du lait chez la chèvre. In: *International Symposium on the Milking of Small Ruminants*, 6, 1999, Athens. *Proceedings Wageningen: Wageningen Press*, 1999. *Milking and milk products of dairy sheep and goats*: p.157-163.
- DE MOURA, Sílvia CSR et al. Encapsulating anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* L. calyces by ionic gelation: Pigment stability during storage of microparticles. *Food Chemistry*, v. 241, p. 317-327, 2018.

- DE SANTIAGO, M. C. P. Effects of encapsulating agents on anthocyanin retention in pomegranate powder obtained by the spray drying process. *LWT*. 2016; 73: 551–6.
- DONG, Shengye *et al.* Multifunctional intelligent film integrated with purple sweet potato anthocyanin and quercetin-loaded chitosan nanoparticles for monitoring and maintaining freshness of shrimp. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 35, n. December 2022, p. 101022, 2023.
- DOS SANTOS, Lúcia de Fátima L.; CASTRO, Roberto Soares; COSTA, Elizabeth Oliveira da. "California Mastitis Test" e "Whiteside Modificado" como critério de triagem para mastite caprina. 1995.
- DUTRA, Carina Morais Correa *et al.* Parâmetros de qualidade do leite de cabra armazenado sob frio. *Arquivos do Instituto Biológico*, v. 81, n. 01, p. 36-42, 2014.
- EBRAHIMI, Vajiheh *et al.* Fabrication and characterization of a pH-sensitive indicator film by purple basil leaves extract to monitor the freshness of chicken fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 34, n. June, p. 100946, 2022.
- EKER, Merve Eda *et al.* A review of factors affecting anthocyanin bioavailability: Possible implications for the inter-individual variability. *Foods*, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2019.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/gado_de_leite/pre-producao/politicas/importancia-economica-e-social. Acesso em: 17/05/2025.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/gado_de_leite/pre-producao/qualidade-e-seguranca/qualidade. Acesso em: 17/05/2025.
- ETXABIDE, Alaitz; KILMARTIN, Paul A.; MATÉ, Juan I. Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. *Food Control*, v. 121, n. May 2020, 2021.
- EZATI, Parya *et al.* Intelligent pH-sensitive indicator based on starch-cellulose and alizarin dye to track freshness of rainbow trout fillet. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 132, p. 157–165, 2019.
- EZE, Fredrick Nwude; JAYEOYE, Titilope John; SINGH, Sudarshan. Fabrication of intelligent pH-sensing films with antioxidant potential for monitoring shrimp freshness via the fortification of chitosan matrix with broken Riceberry phenolic extract. *Food Chemistry*, v. 366, n. July 2021, p. 130574, 2022.
- FAN, Linlin *et al.* Copigmentation effects of phenolics on color enhancement and stability of blackberry wine residue anthocyanins: Chromaticity, kinetics and structural simulation. *Food chemistry*, v. 275, p. 299-308, 2019.

- FAO. The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome: Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2019.
- FDA. U.S. Food and Drug Administration. Confused by Date Labels on Packaged Foods?. 2019. Disponível em: <https://www.fda.gov/consumers/consumer-updates/confused-date-labels-packaged-foods>.
- FERNANDES, A. C. *et al.* Purple-fleshed sweet potato: cultivation, chemical composition and industrial applications. *Food Reviews International*, 2024.
- GAO, Li *et al.* κ -carrageenan-based pH-sensing films incorporated with anthocyanins or/and betacyanins extracted from purple sweet potatoes and peels of dragon fruits. *Process Biochemistry*, v. 121, n. 56, p. 463–480, 2022.
- GENÇDAĞ, E. *et al.* Anthocyanins: stability, stabilization strategies and food applications. *Food Chemistry*, v. 458, p. 140136, 2024.
- GENÇDAĞ, Esra *et al.* Copigmentation and stabilization of anthocyanins using organic molecules and encapsulation techniques. *Current Plant Biology*, v. 29, p. 100238, 2022.
- GRAM, Lone *et al.* Food spoilage - Interactions between food spoilage bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, v. 78, n. 1–2, p. 79–97, 2002.
- GULDIKEN, Burcu *et al.* Ascorbic acid-induced degradation of liposome-encapsulated acylated and non-acylated anthocyanins of black carrot extract. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 101, n. 13, p. 5707-5714, 2021.
- GUO, Min *et al.* Intelligent double-layer fiber mats with high colorimetric response sensitivity for food freshness monitoring and preservation. *Food Hydrocolloids*, v. 101, n. October 2019, p. 105468, 2020.
- HALÁSZ, Katalin; CSÓKA, Levente. Black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace extract immobilized in chitosan for colorimetric pH indicator film application. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 16, n. March, p. 185–193, 2018.
- HE, J. *et al.* Anthocyanins in intelligent food packaging: chemistry, stability and applications. *Food Chemistry*, v. 453, p. 140012, 2024.
- HE, Zhiyong *et al.* Interactions of milk α - and β -casein with malvidin-3-O-glucoside and their effects on the stability of grape skin anthocyanin extracts. *Food chemistry*, v. 199, p. 314-322, 2016.
- HERNÁNDEZ-MUÑOZ, Pilar *et al.* Nanotechnology in food packaging. In: *Nanomaterials for Food Applications*. Elsevier, 2019. p. 205-232.
- HERNÁNDEZ-SANTOS, B. *et al.* Purple-fleshed sweet potato: nutritional composition, bioactive compounds and food applications. *Food Bioscience*, v. 54, p. 102915, 2023.

HERNÁNDEZ-SANTOS, Betsabé *et al.* Chemical composition, techno-functional properties, and bioactive components of blends of blue corn/purple sweet potato for its possible application in the food industry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, v. 17, n. 2, p. 1909–1920, 2023.

HUANG, Shaoyun *et al.* Preparation and dynamic response properties of colorimetric indicator films containing pH-sensitive anthocyanins. *Sensors and Actuators Reports*, v. 3, p. 100049, 2021.

Ji, Chenfeng *et al.* Purification, characterization, and in vitro antitumor activity of a novel glucan from the purple sweet potato *Ipomoea Batatas* (L.) Lam. *Carbohydrate Polymers*, v. 257, n. January, p. 117605, 2021.

Ji, Hua *et al.* Analysis on the Nutrition Composition and Antioxidant Activity of Different Types of Sweet Potato Cultivars. *Food and Nutrition Sciences*, v. 06, n. 01, p. 161–167, 2015.

JIA, Yangyang *et al.* Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioproducts Processing*, v. 118, p. 67–76, 2019.

JIANG, G. *et al.* Preparation and characterization of pH-sensitive intelligent films based on starch/carboxymethyl cellulose and purple sweet potato anthocyanins. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 155, p. 142–148, 2020.

JIANG, Guangyang *et al.* Preparation and characterization of indicator films from carboxymethyl-cellulose/starch and purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) lam) anthocyanins for monitoring fish freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 143, p. 359–372, 2020.

JIANG, Tian *et al.* The botanical profile, phytochemistry, biological activities and protected-delivery systems for purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.): An up-to-date review. *Food Research International*, p. 111811, 2022.

KE, F.; LIU, D.; QIN, J.; YANG, M. Functional pH-sensitive film containing purple sweet potato anthocyanins for pork freshness monitoring and cherry preservation. *Foods*, v. 13, n. 5, p. 736, 2024.

KHAZAEI, K. Mahdavee *et al.* Application of maltodextrin and gum Arabic in microencapsulation of saffron petal's anthocyanins and evaluating their storage stability and color. *Carbohydrate polymers*, v. 105, p. 57-62, 2014.

Khodabakhsh, P., Bazargani-Gilani, B. Comparação do pH e da sensibilidade a gases de filmes inteligentes de quitosana/álcool polivinílico contendo indicadores de casca de raiz de beterraba

e repolho roxo no monitoramento da deterioração do leite. *Food Anal. Methods* (2025). <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12161-025-02774-2>

KOOSHA, Mojtaba; HAMED, Sepideh. Intelligent chitosan/PVA nanocomposite films containing black carrot anthocyanin and bentonite nanoclays with improved mechanical, thermal and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*, v. 127, p. 338–347, 2019.

KOSHY, Rekha Rose et al. Preparation of pH sensitive film based on starch/carbon nano dots incorporating anthocyanin for monitoring spoilage of pork. *Food Control*, v. 126, p. 108039, 2021.

KUMAR, Ajesh *et al.* Trends in Edible Packaging Films and its Prospective Future in Food: A Review. *Applied Food Research*, v. 2, n. 1, p. 100118, 2022.

KUMAR, Ajesh et al. Trends in Edible Packaging Films and its Prospective Future in Food: A Review. *Applied Food Research*, v. 2, n. 1, p. 100118, 2022.

KUMAR, Pritha et al. Encapsulation techniques for enhancing the stability and bioavailability of food: A review. *Int. J. Adv. Biochem. Res*, v. 8, p. 16-23, 2024.

KUMAR, S. et al. Biopolymer-based films reinforced with natural fillers: mechanical, barrier and functional properties. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023.

KUREK, Mia *et al.* Comparison of two pH responsive color changing bio-based films containing wasted fruit pomace as a source of colorants. *Journal of Food Science*, v. 84, n. 9, p. 2490–2498, 2019.

KUSWANDI, Bambang. Freshness Sensors for Food Packaging. Elsevier, 2017. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21876-3>.

LAUER, M. K. et al. Recent advances in starch-based films toward food packaging applications: physicochemical, mechanical, and functional properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020.

LAURIA, Elise dos Santos; NICOLINI, JOAO Victor. APLICAÇÃO DE NANOMATERIAIS NO DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS PARA ALIMENTOS. In: Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química. Anais...Diamantina (MG) online, 2021. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/wendeq2021/349921-APLICACAO-DE-NANOMATERIAIS-NO-DESENVOLVIMENTO-DE-EMBALAGENS-PARA-ALIMENTOS>. Acesso em: 28/07/2025.

LI, Chenchen *et al.* A new method to prepare color-changeable smart packaging films based on the cooked purple sweet potato. *Food Hydrocolloids*, v. 137, n. November 2022, p. 108397, 2023.

- LI, Libo *et al.* Quantitative detection of nitrite with N-doped graphene quantum dots decorated N-doped carbon nanofibers composite-based electrochemical sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 252, p. 17-23, 2017.
- LI, Siying *et al.* Cassava starch/carboxymethylcellulose edible films embedded with lactic acid bacteria to extend the shelf life of banana. *Carbohydrate Polymers*, v. 248, n. June, p. 116805, 2020.
- LI, Yuan *et al.* A pH-indicating intelligent packaging composed of chitosan-purple potato extractions strength by surface-deacetylated chitin nanofibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 127, p. 376–384, 2019.
- LIU, Bin *et al.* Preparation and characterization of intelligent starch/PVA films for simultaneous colorimetric indication and antimicrobial activity for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, v. 157, p. 842–849, 2017.
- LIU, Danfei *et al.* A colorimetric film based on polyvinyl alcohol/sodium carboxymethyl cellulose incorporated with red cabbage anthocyanin for monitoring pork freshness. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 28, n. July 2020, p. 100641, 2021.
- LIU, Jialin *et al.* pH-sensitive and antibacterial films developed by incorporating anthocyanins extracted from purple potato or roselle into chitosan/polyvinyl alcohol/nano-ZnO matrix: Comparative study. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 178, p. 104–112, 2021.
- LIU, P. *et al.* *Effects of ultrasonication on starch/CMC composite films*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021.
- LIU, Yaowen *et al.* Fabrication and characterization of pH-responsive intelligent films based on carboxymethyl cellulose and gelatin/curcumin/chitosan hybrid microcapsules for pork quality monitoring. *Food Hydrocolloids*, v. 124, p. 107224, 2022.
- LUCAS, Juliana Volz; FERRI, Nubia Marilin Lettnin; WAGNER, Julia Goetten; CONCENÇO, Fernanda; VIZZOTTO, Márcia. Caracterização de batata-doce de polpa roxa (*Ipomoea batatas* (L.) LAM.) em duas safras. 2022.
- Luchese, C. L., Sperotto, N., Spada, J. C., & Tessaro, I. C. Effect of blueberry agro- industrial waste addition to corn starch-based films for the production of a pH-indicator film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 11–18. 2017.
- Luchese, C. L.; Garrido, T.; Spada, J. C.; Tessaro, I. C.; de la Caba, K. (2018). *Development and characterization of cassava starch films incorporated with blueberry pomace*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 834–839.

- LUECHINGER, Norman A. et al. Highly sensitive optical detection of humidity on polymer/metal nanoparticle hybrid films. *Langmuir*, v. 23, n. 6, p. 3473-3477, 2007.
- MAHDAVI, Sahar Akhavan et al. Storage stability of encapsulated barberry's anthocyanin and its application in jelly formulation. *Journal of food engineering*, v. 181, p. 59-66, 2016.
- MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; GARCIA, M. A.; MARTINO, M. N.; ZARITZKY, N. E. Effects of controlled storage on thermal, mechanical and barrier properties of plasticized films from different starch sources. *Journal of Food Engineering*, v. 75, p. 453–460, 2006.
- MANSOUR, Mohammed; SALAH, Mahmoud; XU, Xiaoyun. Effect of microencapsulation using soy protein isolate and gum arabic as wall material on red raspberry anthocyanin stability, characterization, and simulated gastrointestinal conditions. *Ultrasonics sonochemistry*, v. 63, p. 104927, 2020.
- MELO, Rafael Leandro Fernandes; SALES, Misael Bessa; BIZERRA, Viviane de Castro; SOUSA JUNIOR, Paulo Gonçalves de; CAVALCANTE, Antônio Luthierre Gama; FREIRE, Tiago Melo; SIMÃO NETO, Francisco; BILAL, Muhammad; JESIONOWSKI, Teofil; SOARES, João Maria. Recent applications and future prospects of magnetic biocatalysts. *International Journal Of Biological Macromolecules*, [S.L.], v. 253, p. 126709, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126709>.
- MENG, Meng *et al.* Structural characterization and induction of tumor cell apoptosis of polysaccharide from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 235, n. August 2022, p. 123799, 2023.
- MENG, X. *et al.* Purple sweet potato anthocyanins: chemistry, stability and food applications. *Food Chemistry*, v. 430, p. 137153, 2023.
- MERZ, Barbara *et al.* A novel colorimetric indicator film based on chitosan, polyvinyl alcohol and anthocyanins from jambolan (*Syzygium cumini*) fruit for monitoring shrimp freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 153, p. 625–632, 2020.
- MIAO, X. *et al.* Preparation of riclin polysaccharide/polyvinyl alcohol films containing purple sweet potato anthocyanins for shrimp freshness monitoring. *Food Chemistry*, v. 405, p. 134878, 2023.
- MIAO, Yaqiong *et al.* Exopolysaccharide riclin and anthocyanin-based composite colorimetric indicator film for food freshness monitoring. *Carbohydrate Polymers*, v. 314, p. 120882, 2023.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animal/qualidade-do-leite-pnql>. Acesso em: 17/05/2025.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite>. Acesso em: 17/05/2025.

MOAZAMI GOODARZI, Mohsen *et al.* Development of an easy-to-use colorimetric pH label with starch and carrot anthocyanins for milk shelf life assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 153, p. 240–247, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.014>.

Mohd Nordin, N. A., Nazmi, N. N. M., Isa, M. I. N., & Sarbon, N. M. (2022). Characterisation and colour response of smart sago starch-based packaging films incorporated with *Brassica oleracea* anthocyanin. *Membranes*, 12(10), 913.

MÜLLER CMO, YAMASHITA F, LAURINDO JB. Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach. *Carbohydrate Polymers*, 2008.

MÜLLER, C. M. O.; LAURINDO, J. B.; YAMASHITA, F. Composites of thermoplastic starch and nanoclays produced by extrusion and thermopressing. *Carbohydrate Polymers*, v. 89, p. 504–510, 2012.

MUTHURAJ, Rajendran; MISRA, Manjusri; MOHANTY, Ama Kumar. Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 135, n. 24, p. 35, 2018.

MUTMAINNA, Inayatul *et al.* Development of PVA-chitosan based smart packaging with the addition of red cabbage (*Brassica Oleracea* Var. capitata F. rubra) anthocyanin extract and copper-based metal-organic material (Cu-Mof). *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 313, p. 144205, 2025.

NIU, Xiaoqing *et al.* Design and characterization of bio-amine responsive films enriched with colored potato (Black King Kong) anthocyanin for visual detecting pork freshness in cold storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, v. 15, n. 5, p. 4659–4668, 2021.

NOWAK, Dorota; JAKUBCZYK, Ewa. The freeze-drying of foods—the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*, v. 9, n. 1488, p. 1–27, 2020.

OMS. Food Safety. 2022. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>.

ONU. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acessado em 21 de abril de 2023.

- OYINLOYE, Timilehin Martins; YOON, Won Byong. Effect of freeze-drying on quality and grinding process of food produce: A review. *Processes*, v. 8, n. 3, p. 1–23, 2020.
- PEI, J. *et al.* A comprehensive review on starch-based sustainable edible films loaded with bioactive components for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 274, p. 133332, 2024.
- Pelissari *et al.* (2013). Cassava starch films reinforced with cellulose fibers. *Carbohydrate Polymers*, 2013.
- PELISSARI, F. M.; FERREIRA, D. C.; LOUZADA, L. B.; *et al.* Biodegradable films based on banana starch and cellulose fibers. *Carbohydrate Polymers*, v. 92, p. 224–231, 2013.
- PELLISSERY, Abraham Joseph *et al.* Spoilage bacteria and meat quality. Elsevier Inc., 2019. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-819233-7.00017-3>.
- PEREIRA JR, Valdir Aniceto; DE ARRUDA, Iza Natália Queiroz; STEFANI, Ricardo. Active chitosan/PVA films with anthocyanins from Brassica oleraceae (Red Cabbage) as Time–Temperature Indicators for application in intelligent food packaging. *Food hydrocolloids*, v. 43, p. 180-188, 2015.
- PRIYADARSHI, R.; EZATI, P.; RHIM, J. W. Recent advances in intelligent food packaging systems based on natural pigments. *Trends in Food Science & Technology*, v. 109, p. 492–505, 2021.
- QIAN, Bing-Jun *et al.* The effects of gallic/ferulic/caffeic acids on colour intensification and anthocyanin stability. *Food Chemistry*, v. 228, p. 526-532, 2017.
- RAKIĆ, Violeta *et al.* pH-induced structural forms of cyanidin and cyanidin 3-O- β -glucopyranoside. *Dyes and Pigments*, v. 165, n. June 2018, p. 71–80, 2019.
- RIAZ, Muhammad; ZIA-UL-HAQ, Muhammad; SAAD, Bashir. Biosynthesis and stability of anthocyanins. In: *Anthocyanins and Human Health: Biomolecular and therapeutic aspects*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 71-86.
- ROCHA, Guilherme Sales da; RODRIGUES, Leonan dos Santos; FORNASIER, Francesca; NICOLINI, João Victor; FERRAZ, Helen Conceição. Trends in Electrochemical Immunosensors for Lung Cancer Detection: a bibliometric review analysis. *Microchemical Journal*, [S.L.], v. 222, p. 117177, mar. 2026. Elsevier BV.
- ROSA, Patricia Pinto; ZANELA, Maira Balbinotti; RIBEIRO, Maria Edi Rocha; FLUCK, Ana Carolina; ANGELO, Isabelle Damé Veber; FERREIRA, Otoniel Geter Lauz; COSTA, Olmar Antônio Denardin. Fatores etiológicos que afetam a qualidade do leite e o Leite Instável Não Ácido (LINA). *REDVET. Revista Electrónica de Veterinária*, v. 18, n. 12, p. 1-17, 2017.

- Roy S, Rhim JW (2021) Corante alimentar antocianina e sua aplicação em filmes indicadores de mudança de cor sensíveis ao pH. *Crit Rev Food Sci Nutr* 61:2297–2325, 2021.
- ROY, Swarup; RHIM, Jong Whan. Anthocyanin food colorant and its application in pH-responsive color change indicator films. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 61, n. 14, p. 2297–2325, 2021.
- SÁNCHEZ-MACÍAS, D., MORALES DELANUEZ, A., TORRES, A. et al. Effects of addition of somatic cells to caprine milk on cheese quality. *International Dairy Journal*, v. 29, n. 2, p. 61-67, 201.
- SANTOS, M. V.; FONSECA, L. F. L. Estratégias para controle de mastite e melhoria da qualidade do leite. São Paulo: Manole, p. 314. 2007.
- SANYANG, M. L.; SAPUAN, S. M.; JAWAID, M.; ISHAK, M. R.; SAHARI, J. Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm starch. *Journal of Food Science and Technology*, v. 53, p. 326–336, 2016.
- Silva, Mariá Toledo de Carvalho *et al.* Development and application of pH-indicator film based on freeze-dried purple-fleshed sweet potato, starch, and CMC. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023a.
- Silva, Mariá Toledo de Carvalho *et al.* Development of a biodegradable smart film from purple fleshed sweet potato for food quality assessment. *Observatorio de La Economia Latinoamericana*, p. 2721–2748, 2023b.
- SILVA, Nayane Matias *et al.* Adição de extrato de casca de jaboticaba no desenvolvimento de embalagem inteligente para queijo prato. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 4, p. 19512–19532, 2020.
- SILVA, Ricácia De Sousa *et al.* Elaboration and physicochemical characterization of sweet potato flour (*Ipomoea batatas* L.). *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, v. 14, n. 01, p. 127–131, 2020.
- SMERIGLIO, Antonella *et al.* Chemistry, Pharmacology and Health Benefits of Anthocyanins. *Phytotherapy Research*, n. April, p. 1265–1286, 2016.
- SOHANY, Mouluda *et al.* Characterization of anthocyanin associated purple sweet potato starch and peel-based pH indicator films. *Foods*, v. 10, n. 9, 2021.
- STEED, L. E.; TRUONG, V. D. Anthocyanin content, antioxidant activity, and selected physical properties of flowable purple-fleshed sweetpotato purees. *Journal of Food Science*, v. 73, n. 5, p. 215–221, 2008.

- SUN, Xiang Dong; HOLLEY, Richard A. Antimicrobial and Antioxidative Strategies to Reduce Pathogens and Extend the Shelf Life of Fresh Red Meats. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 11, n. 4, p. 340–354, 2012.
- TAN, Chen et al. Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the synergistic stabilization of anthocyanins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 20, n. 4, p. 3164-3191, 2021.
- TANAKA, Masaru *et al.* Functional components in sweetpotato and their genetic improvement. *Breeding Science*, v. 67, n. 1, p. 52–61, 2017.
- TARONE, Adriana Gadioli; CAZARIN, Cinthia Baú Betim; MAROSTICA JUNIOR, Mario Roberto. Anthocyanins: New techniques and challenges in microencapsulation. *Food Research International*, v. 133, p. 109092, 2020.
- TEIXEIRA DE OLIVEIRA, THAÍS. OBTENÇÃO DE BIOPLÁSTICO E INCORPORAÇÃO DE ANTOCIANINA COMO SENSOR DE ALTERAÇÃO DE pH. 2025.
- Teixeira, Samiris Côcco. Desenvolvimento de filme inteligente incorporado de antocianinas de açaí como indicador de qualidade de alimentos. Viçosa, MG, 2021.
- TERCI, Daniela Brotto Lopes; ROSSI, Adriana Vitorino. Indicadores naturais de pH: Usar papel ou solução?. *Química Nova*, v. 25, n. 4, p. 684-688, 2002.
- TRUONG, V.D.; AVULA, R.Y., PECOTA, K.V.; YENCHO, G.C. Sweetpotato Production, Processing, and Nutritional Quality. In *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing*. Volume II, Second Edition. P. 811, 2018.
- VIEIRA, E. F. et al. *Hydrophobicity strategies of starch-based films: recent advances and perspectives*. *Polymers*, 2026.
- VIEIRA, M. G. A. et al. Natural-based plasticizers and biopolymer films: a review. *Food Hydrocolloids*, 2011.
- VITAL, Aline Nataly Soares *et al.* Physicochemical composition and antioxidant activity of sweet potato flours from different cultivars produced in the Sub-middle São Francisco region. *Ciencia Rural*, v. 53, n. 3, 2023.
- WANG, Honglu *et al.* Isolation and characterization of starch from light yellow, orange, and purple sweet potatoes. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 160, p. 660–668, 2020.
- WANG, Xinyu *et al.* Novel hydrophobic colorimetric films based on ethylcellulose/castor oil/anthocyanins for pork freshness monitoring. *Lwt*, v. 164, n. January, p. 113631, 2022.
- WANGMO, Lungten *et al.* A novel sensor based on bead-counting of purple sweet potato tapioca pearl for freshness monitoring of shrimp. *Food Chemistry*, v. 368, p. 130863, 2022.

- WEBER, Fabian; BOCH, Kerstin; SCHIEBER, Andreas. Influence of copigmentation on the stability of spray dried anthocyanins from blackberry. *Lwt*, v. 75, p. 72-77, 2017.
- WEI, Yu Chia *et al.* Active gellan gum/purple sweet potato composite films capable of monitoring pH variations. *Food Hydrocolloids*, v. 69, p. 491–502, 2017.
- WILPISZEWSKA, K. *et al.* *Hydrophilic films based on carboxymethylated derivatives of starch and cellulose*. *Polymers*, 2020.
- XIAOWEI, Huang; XIAOBO, Zou; JIEWEN, Zhao; JIYONG, Shi; ZHIHUA, Li; TINGTING, Shen. Monitoring the biogenic amines in Chinese traditional salted pork in jelly (Yao-meat) by colorimetric sensor array based on nine natural pigments. *International Journal of Food Science & Technology*, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 203-209, 14 ago. 2014. Oxford University Press (OUP).
- XU, Jianteng *et al.* Characterisation and stability of anthocyanins in purple-fleshed sweet potato P40. *Food Chemistry*, v. 186, p. 90–96, 2015.
- Xu, M. *et al.* (2024). Recent advances in anthocyanin-based films and its application in sustainable intelligent food packaging: A review. *Food Control*, 162, 110431.
- XUE, Jia *et al.* Enhanced stability of red-fleshed apple anthocyanins by copigmentation and encapsulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 99, n. 7, p. 3381-3390, 2019.
- YAM, Kit L.; TAKHISTOV, Paul T.; MILTZ, Joseph. Intelligent Packaging: Concepts and Applications. *Journal of Food Science*, v. 70, n. 1, p. 1–10, 2005.
- YIN, Wenqi *et al.* Recent advances in biomolecule-based films and coatings for active and smart food packaging applications. *Food Bioscience*, v. 52, n. November 2022, p. 102378, 2023.
- YONG, H. *et al.* Development of intelligent films based on purple sweet potato anthocyanins incorporated into different polymer matrices for freshness monitoring. *Food Chemistry*, v. 366, p. 130594, 2022.
- YONG, Huimin *et al.* Active/intelligent packaging films developed by immobilizing anthocyanins from purple sweetpotato and purple cabbage in locust bean gum, chitosan and κ -carrageenan-based matrices. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 211, n. April, p. 238–248, 2022.
- YONG, Huimin *et al.* Active/intelligent packaging films developed by immobilizing anthocyanins from purple sweetpotato and purple cabbage in locust bean gum, chitosan and κ -carrageenan-based matrices. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 211, p. 238-248, 2022.

YONG, Huimin *et al.* Development of antioxidant and intelligent pH-sensing packaging films by incorporating purple-fleshed sweet potato extract into chitosan matrix. *Food Hydrocolloids*, v. 90, n. October 2018, p. 216–224, 2019.

Zamuner, F., Silveira, T. S., Brito, L. F., Alcântara, L. A., & Silva, M. R. (2009). Contagem de células somáticas de leite de cabra obtido na região de Viçosa-MG. In: Congresso Brasileiro de Zootecnia, 19.; Congresso Internacional de Zootecnia, 11.; Fórum de Coordenadores de cursos de Zootecnia das Universidades Brasileiras, 5.; Fórum de Estudantes de cursos de Zootecnia das Universidades Brasileiras, 5.; Reunião Nacional de Ensino de Zootecnia, 15.; Fórum de Entidades de Zootecnistas, 22., 2009, Águas de Lindóia. Visão estratégica de cadeias do agronegócio: anais. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos: Associação Brasileira de Zootecnistas, 2009.

ZANELA, Maira Balbinotti; Fischer, V.; Ribeiro, M. E. R. Unstable nonacid milk and milk composition of Jersey cows on feed restriction. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, p. 835-840, 2006.

ZHAI, Xiaodong *et al.* A colorimetric hydrogen sulfide sensor based on gellan gum-silver nanoparticles bionanocomposite for monitoring of meat spoilage in intelligent packaging. *Food chemistry*, v. 290, p. 135-143, 2019.

ZHAI, Xiaodong; SUN, Yue; CEN, Shaoyi; WANG, Xinyu; ZHANG, Junjun; YANG, Zhikun; LI, Yanxiao; WANG, Xin; ZHOU, Chenguang; ARSLAN, Muhammad. Anthocyanins-encapsulated 3D-printable bigels: a colorimetric and leaching-resistant volatile amines sensor for intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, [S.L.], v. 133, p. 107989, dez. 2022. Elsevier BV.

ZHANG, Chao *et al.* Time–Temperature indicator for perishable products based on kinetically programmable Ag overgrowth on Au nanorods. *ACS nano*, v. 7, n. 5, p. 4561-4568, 2013.

ZHANG, Junjun *et al.* Preparation of an intelligent pH film based on biodegradable polymers and roselle anthocyanins for monitoring pork freshness. *Food chemistry*, v. 272, p. 306-312, 2019.

ZHANG, Junjun; HUANG, Xiaowei; ZHANG, Jianing; LIU, Li; SHI, Jiyong; MUHAMMAD, Arslan; ZHAI, Xiaodong; ZOU, Xiaobo; XIAO, Jianbo; LI, Zhihua. Development of nanofiber indicator with high sensitivity for pork preservation and freshness monitoring. *Food Chemistry*, [S.L.], v. 381, p. 132224, jul. 2022. Elsevier BV.

ZHANG, Kailong *et al.* Novel pH-sensitive films based on starch/polyvinyl alcohol and food anthocyanins as a visual indicator of shrimp deterioration. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 145, p. 768–776, 2020.

- ZHANG, Long et al. Characterization and comparative study of starches from seven purple sweet potatoes. *Food Hydrocolloids*, v. 80, p. 168–176, 2018.
- ZHANG, Rui et al. Microencapsulation of anthocyanins extracted from grape skin by emulsification/internal gelation followed by spray/freeze-drying techniques: Characterization, stability and bioaccessibility. *Lwt*, v. 123, p. 109097, 2020.
- ZHANG, Xinyue et al. Intelligent colorimetric film incorporated with anthocyanins-loaded ovalbumin-propylene glycol alginate nanocomplexes as a stable pH indicator of monitoring pork freshness. *Food Chemistry*, v. 368, n. April 2021, p. 130825, 2022.
- ZHANG, Y. et al. Recent advances in starch-based biodegradable films for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021.
- ZHAO, Lei et al. Anthocyanin-based pH-sensitive smart packaging films for monitoring food freshness. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 9, p. 100340, 2022.
- ZHAO, Lei et al. Protective effect and mechanism of action of xanthan gum on the color stability of black rice anthocyanins in model beverage systems. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 164, p. 3800–3807, 2020.
- ZHAO, Mengna *et al.* Monitoring dynamic changes in chicken freshness at 4 °C and 25 °C using pH-sensitive intelligent films based on sodium alginate and purple sweet potato peel extracts. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 216, n. May, p. 361–373, 2022.
- ZONG, Zihao et al. Preparation and characterization of a novel intelligent starch/gelatin binary film containing purple sweet potato anthocyanins for *Flammulina velutipes* mushroom freshness monitoring. *Food Chemistry*, v. 405, n. PB, p. 134839, 2023.