

Uso de biopolímeros no recobrimento de papéis para embalagens alimentícias: uma breve revisão

Use of biopolymers in coating paper for food packaging: a brief review

Uso de biopolímeros en papel de recubrimiento para empaque de alimentos: una breve revisión

Recebido: 02/05/2022 | Revisado: 11/05/2022 | Aceito: 18/05/2022 | Publicado: 23/05/2022

Caio Cesar Nemer Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-6514>
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
E-mail: caionemer13@hotmail.com

Jeferson Silva Cunha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6722-9051>
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
E-mail: jeferson.cunha@ufv.br

Ana Carolina Corrêa Furtini

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2106-6602>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
carol.furtini@gmail.com

Carolina Aparecida dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3469-9011>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
carolinaapnep@gmail.com

Eduardo Hélio de Novais Miranda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3156-658X>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
eduardohelio13@gmail.com

Rafaela Celis de Souza Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3395-2951>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
rafaela_souza26@hotmail.com

Diogo Antonio Correa Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3967-4574>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
diogogomes548@gmail.com

Gustavo Henrique Denzin Tonoli

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6502-8974>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
gustavotonoli@yahoo.com.br

Ana Flávia Coelho Pacheco

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7220-1432>
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
ana.f.pacheco@ufv.br

Paulo Henrique Costa Paiva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5455-7790>
Instituto de Laticínios Cândido Tostes, Brasil
paulohcp@epamig.br

Resumo

As embalagens à base de papel se destacam por ser um material abundante, atóxico, biodegradável e de baixo custo de comercialização em relação a outros materiais convencionais. Entretanto, o papel oferece baixa resistência ao vapor de água, óleos e gases, o que pode tornar frágil as embalagens, impossibilitando o seu uso para produtos perecíveis. Como alternativa, são utilizados biopolímeros para recobrimento de papéis, tais como derivados da celulose, amidos, quitosana ou quitina, proteínas (animal ou vegetal) e lipídeos. Esses biopolímeros oferecem propriedades avançadas e aprimoradas quando utilizados para recobrimento de papéis. O objetivo desta revisão é abordar sobre os principais biopolímeros estudados e testados para o recobrimento de papéis em embalagens alimentícias, sendo descritas suas principais características, além de apresentar trabalhos que mostram que os biopolímeros mencionados têm-se mostrado promissores, possuindo propriedades compatíveis para o uso em larga escala no recobrimento de papéis em embalagens. Com este trabalho, esperamos contribuir no avanço de pesquisas científicas e projetos que promovam a utilização de biopolímeros no recobrimento de papéis utilizados na produção de embalagens alimentícias.

Palavras-chave: Amido; Celulose; Enzima; Papel; Proteínas.

Abstract

Paper-based packaging is abundant, non-toxic, from renewable resource, biodegradable material and of low marketing cost compared to other conventional materials. However, paper offers low resistance to water vapor, oils and gases, which may restrict its use for perishable products. As an alternative, biopolymers are used for coating papers, such as cellulose derivatives, starches, chitosan or chitin, proteins (animal or vegetable) and lipids. These biopolymers offer advanced and enhanced properties when used for coating papers. The objective of this review is to address the main biopolymers studied and tested for coating paper in food packaging, describing their main characteristics, in addition to presenting works that show that the mentioned biopolymers have shown to be promising, having compatible properties for the use on a large scale in the coating of paper in packaging. With this work, we hope to contribute to the advancement of scientific research and projects that promote the use of biopolymers in paper coating for use in production of food packaging.

Keywords: Cellulose; Proteins; Paper; Starch; Teaching.

Resumen

Los envases a base de papel destacan por ser un material abundante, no tóxico, biodegradable y de bajo coste de comercialización frente a otros materiales convencionales. Sin embargo, el papel ofrece una baja resistencia al vapor de agua, aceites y gases, lo que puede hacer que los envases sean frágiles, imposibilitando su uso para productos perecederos. Como alternativa, para el recubrimiento de papeles se utilizan biopolímeros, como derivados de la celulosa, almidones, quitosano o quitina, proteínas (animales o vegetales) y lípidos. Estos biopolímeros ofrecen propiedades avanzadas y mejoradas cuando se usan para recubrir papeles. El objetivo de esta revisión es abordar los principales biopolímeros estudiados y probados para el recubrimiento de papel en envases de alimentos, describiendo sus principales características, además de presentar trabajos que demuestren que los biopolímeros mencionados han mostrado ser promisorios, teniendo propiedades compatibles para el uso en a gran escala en el recubrimiento de papel en los embalajes. Con este trabajo, esperamos contribuir al avance de investigaciones científicas y proyectos que promuevan el uso de biopolímeros en el recubrimiento de papeles utilizados en la producción de envases para alimentos.

Palabras clave: Almidones; Celulosa; Enseñanza; Papel; Proteínas.

1. Introdução

O acúmulo de materiais não renováveis no ambiente é um problema social a ser solucionado. Parte dele está associado à utilização de embalagens pelas indústrias de alimentos, majoritariamente constituídas de materiais não biodegradáveis tais como plástico, metal, alumínio, dentre outros (Das & Tiwari, 2018). Na tentativa de reduzir os impactos ambientais, a utilização do papel na fabricação de embalagens tem despertado interesse principalmente da indústria alimentícia, pois o tempo de vida desses produtos é curto e o descarte das embalagens é feito imediatamente após o consumo do alimento. Porém, a natureza hidrofílica da celulose ocasionada pela presença dos grupos OH- em sua estrutura (Martins et al., 2021), torna o uso do papel em sua forma original limitado devido à baixa resistência ao vapor de água. Diante deste contexto, materiais de origem biológica são ideais para substituir os sintéticos no recobrimento de papéis para embalagens.

As embalagens de papéis recobertas com materiais de origem biológica podem ser uma alternativa viável para reduzir ou mitigar os problemas relacionados à permeabilidade ao vapor de água e a gases (O₂ e CO₂), atividade antimicrobiana e propriedades mecânicas. Com a finalidade de melhorar as propriedades de barreira das embalagens de papel, diversos materiais de origem biológica já foram estudados, tais como celulose (He et al., 2021), amidos (Nair et al., 2022), quitosana ou quitina (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021), proteínas (animal ou vegetal) (Mihalca et al., 2021) e lipídeos (Matos et al., 2019).

Chi et al., (2020) investigaram o uso de amido quimicamente modificado para o recobrimento de papéis em embalagens. O papelão recoberto com esse material, exibiu uma morfologia de superfície bastante homogênea, melhor resistência mecânica e excelentes propriedades de barreira contra o vapor de água e gorduras. Em outro estudo, Syahida et al. (2020) estudaram o efeito da cera de palma em filmes para aplicação em embalagens de alimentos. Observou-se melhoria nas propriedades mecânicas e maior resistência ao vapor de água, influenciado pela natureza hidrofóbica do material.

Desta forma, o recobrimento dos papéis com biopolímeros é uma busca por processos aplicáveis em escala industrial e com sustentabilidade ecológica. Este trabalho apresenta uma revisão sobre os principais biopolímeros investigados para o recobrimento de papéis em embalagens alimentícias, com o intuito de melhorar as propriedades de barreira desses materiais.

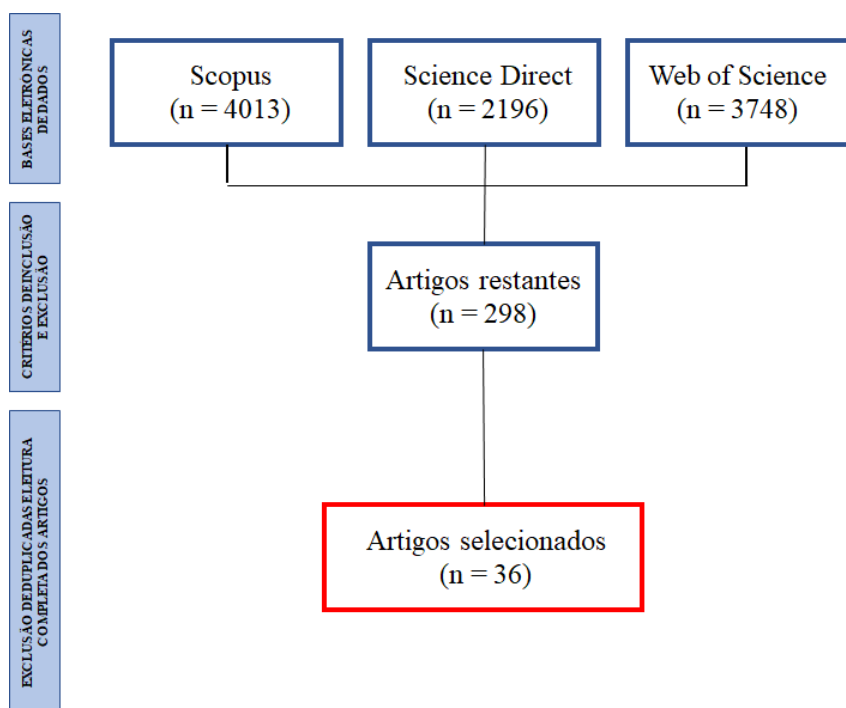
2. Metodologia

O presente estudo trata-se de uma revisão narrativa, sobre o uso de biopolímeros no recobrimento de papéis para embalagens alimentícias. A revisão foi realizada por meio de pesquisas de referências bibliográficas em diferentes bases de indexação, em temas relacionados com o uso de biopolímeros para o recobrimento de papéis em embalagens. Os artigos científicos foram buscados adicionando-se as palavras-chave “biopolímeros”, “biopolímeros naturais”, “celulose”, “embalagens papel”, “biopolímeros e embalagens de papel”, “uso de biopolímeros no recobrimento de embalagens para papel”, “benefícios dos biopolímeros”.

As informações sobre o tema foram retiradas de bases eletrônicas de dados como: Scopus, Science Direct (Elsevier) e Web of Science. Inicialmente foram selecionados 4013 no Scopus, 2196 no Science Direct e 3748 no Web of Science. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e a eliminação de duplicatas, a amostra final foi de 36 artigos, conforme demonstrado na Figura 1.

Os critérios adotados para a seleção dos artigos incluíram publicações em língua inglesa e portuguesa, entre os anos de 1992 a 2022.

Figura 1 – Fluxograma referente a busca de dados.



Fonte: Elaborada pelos autores.

3. Referencial Teórico

3.1 O uso do papel em embalagens

De acordo com a resolução RDC nº 259, de 20 de setembro de 2002 (Brasil, 2002), as embalagens podem ser definidas como qualquer forma de acondicionamento destinado a cobrir, proteger, empacotar, envasar e manter os produtos preservados até a sua comercialização.

Com o objetivo de manter a qualidade e a integridade dos produtos, inovações tecnológicas são cada vez mais comuns e necessárias nesse mercado. Contudo, o amplo uso de materiais de origem não renovável na fabricação de embalagens é uma complexa questão do ponto de vista ambiental. Estudos revelam que aproximadamente 40% dos materiais utilizados na

produção de embalagens são derivados de fontes não renováveis, gerando prejuízos ao ambiente quando são descartados (Das & Tiwari, 2018). Nesse sentido, o uso do papel na fabricação de embalagens destaca-se por se tratar de uma matéria-prima abundante, não tóxica, biodegradável e de baixo custo frente a outros materiais.

Existem diversos tipos de papéis que podem ser aplicados na formulação de embalagens. Dentre eles, o papel cartão merece destaque devido ao seu amplo uso. Este é composto por multicamadas de celulose, oriundo da sobreposição de camadas iguais com gramatura superior a 180 g m⁻², podendo ou não apresentar recobrimento em sua superfície (Rastogi & Samyn, 2015).

O papel cartão pode ser dividido em quatro camadas principais: verso, miolo, capa e coating. O verso é a camada mais externa e é constituído por materiais que apresentam bom desempenho em relação a impressão e envase, visto que diversas embalagens utilizam essa região para descrever as informações inerentes ao produto. O miolo é a camada responsável por garantir a resistência à compressão e ao rasgo. Essa camada geralmente é composta por pasta mecânica, carga mineral e celulose virgem. A capa é camada sobreposta ao miolo e tem como finalidade servir de suporte para a impressão da embalagem. Esta camada é composta por celulose branqueada e recebe uma última camada conhecida por coating ou couchê. Nessa camada, são aplicadas tintas com o objetivo de revestir e diminuir a porosidade do papel, proporcionando brilho e lisura à superfície mais externa (Vera et al., 2020).

A sua composição pode apresentar variações em relação ao tipo de material utilizado e ao número de camadas que o compõem. Quando o papel cartão é produzido a partir de fibras curtas, o material gerado é mais homogêneo e oferece excelentes condições de acabamento de superfície para embalagens que exigem melhor desempenho visual. Já em relação ao produzido com fibras longas, as embalagens conferem maior resistência mecânica e, geralmente, esses materiais são utilizados em produtos que necessitam maiores esforços mecânicos, como por exemplo em sacos de papel kraft (Indriati et al., 2020).

Em relação aos tipos mais comuns de papel cartão, o cartão duplex e o cartão triplex são os mais utilizados. O cartão duplex é composto por três camadas sobrepostas com aplicação de coating na superfície, sendo que o verso não é branqueado. Esse material é o mais utilizado na produção de embalagens de consumo em papel cartão, por exemplo os alimentos fast foods (Yenidoğan, 2020). O cartão triplex, por sua vez, apresenta a mesma composição do cartão duplex, variando apenas em relação ao verso por ser branqueado. As aplicações mais comuns desse material no setor alimentício são embalagens de cafés, chocolates, alimentos congelados, dentre outros (Biji et al., 2015).

3.2 Recobrimento de papéis multicamadas

O uso da nanotecnologia em embalagens de alimentos tende a crescer rapidamente nos próximos anos, influenciado pelo aumento da demanda por materiais considerados ecologicamente sustentáveis, além da necessidade de prolongar o tempo de vida útil dos produtos. O ramo alimentício tem investido de forma crescente em novas tecnologias que possibilitem a substituição de embalagens formadas por polímeros derivados do petróleo por materiais biodegradáveis (Tyagi et al., 2021).

Os papéis utilizados na fabricação de embalagens são compostos basicamente por fibras celulósicas, sendo essas estruturas formadas por moléculas de celulose de cadeia longa, alternando regiões cristalinas e amorfas. A celulose apresenta ao longo de sua estrutura sítios OH- e rede de fibra porosa, o que lhe confere caráter hidrofílico e, conseqüentemente, limita as propriedades de barreira do papel (Wang et al., 2021).

Com isso, as embalagens de papel tornam-se susceptíveis à retenção de água oriunda do ambiente ou do próprio alimento, fragilizando as forças físicas e mecânicas de manutenção das embalagens. Esta transferência do vapor de água se dá através dos espaços vazios do papel, bem como na forma condensada nas paredes das fibras de celulose (Istiqola & Syafiuddin, 2020). Com o objetivo de reverter o problema das propriedades de barreira das embalagens de papel, diversos estudos com recobrimento de papéis têm sido propostos.

Os recobrimentos são quaisquer tipos de coberturas que podem ser depositados na superfície dos alimentos ou entre seus componentes, como por exemplo, as embalagens que armazenam o produto. Estes atuam, principalmente, como barreira a gases e ao vapor de água, modificando a atmosfera interna do alimento, reduzindo o processo de deterioração e garantindo a manutenção da sua qualidade original (Jin et al., 2021). Para a formulação das embalagens recobertas, é necessário que a escolha dos materiais para o recobrimento atenda alguns requisitos, como polímeros com boa aderência à superfície dos papéis, baixa interferência na modificação do sabor e aroma, além de boa aparência para o acabamento (Delezuk et al., 2017). Logo, diversos biopolímeros têm sido estudados com o objetivo de substituir materiais não renováveis no recobrimento de papéis para embalagens. A Figura 2 representa o processo de recobrimento dos papéis para embalagens.

Figura 2 – Esquema do recobrimento de papéis para embalagens.



Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3 Uso de biopolímeros no recobrimento de papéis multicamadas

Os biopolímeros são produzidos a partir de recursos renováveis por ação de micro-organismos, plantas, animais, além da síntese química utilizando açúcares, óleos, amido e gordura. Grande parte desses elementos, apresentam natureza renovável e atoxicidade ao ambiente (Ferfera-harrar & Dairi, 2014). Diversos estudos têm direcionado esforços para obtenção de novos biopolímeros a partir de resíduos de produtos alimentícios e *commodities* agrícolas, uma vez que o aproveitamento desses recursos possibilita ganhos ambientais, sociais e econômicos, visto que outrora esses materiais são descartados pelas empresas responsáveis pela produção (Maraveas, 2020).

O interesse no uso de biopolímeros tornou-se evidente quando as propriedades de biodegradabilidade, biocompatibilidade e baixo custo da matéria-prima foram comprovadas cientificamente, sendo considerado uma alternativa inovadora para substituição de polímeros à base de petróleo, em razão dos impactos ambientais devastadores que esses

materiais oferecem (Elsabee & Abdou, 2013). Os biopolímeros mais utilizados como recobrimento de barreira em embalagens de papel são derivados da celulose, amidos, quitosana ou quitina, proteínas (animal ou vegetal) e lipídeos (Sharma et al., 2019; Duran & Kahve, 2020; Shen et al., 2021). A seguir, relatamos os principais biopolímeros estudados, sendo descrito suas principais características, além de respectivos estudos que testaram o uso desses materiais no recobrimento dos papéis em diferentes aplicações.

3.4 Derivados da celulose

A celulose é o biopolímero mais abundante do mundo, sendo facilmente obtida por meio de plantas, madeiras ou bactérias (Zhu et al., 2022; Yang et al., 2021). Representa de 20 a 40% do peso seco da parede celular dos vegetais e sua produção anual é de mais de 50 bilhões de toneladas (Pereira et al., 2019). A celulose contém três grupos OH⁻, em que as ligações de hidrogênio intermoleculares produzem estrutura fibrosa e acúmulo semicristalino, gerando alta resistência e flexibilidade ao material. Além disso, os grupos OH⁻ primários são facilmente modificados, possibilitando a aplicação da celulose em diversos setores industriais devido à sua versatilidade (Yang et al., 2021).

O baixo custo de produção associado a políticas de desenvolvimento sustentável tem estimulado indústrias mundialmente a buscarem aplicações para os variados materiais derivados da celulose (Xu et al., 2021). No setor de embalagem não é diferente, onde a celulose é atraente pois é abundante, apresenta propriedades intrínsecas (cor, brancura, massa e volume), além de ser natural e renovável. Todas essas características são desejáveis em materiais utilizados na formulação de embalagens, visando reduzir os danos ambientais (Li et al., 2015). Apesar de todas estas vantagens, a celulose pura apresenta baixa processabilidade devido à solubilidade limitada em solventes orgânicos comuns, gerada pelas fortes ligações intra e intermoleculares (Mohd et al., 2017).

Todavia, os derivados da celulose representam uma alternativa viável à celulose pura, por apresentarem melhor capacidade de dissolução. Os derivados da celulose mais conhecidos incluem ésteres de celulose (acetato de celulose), éteres (carboximetilcelulose, metilcelulose e etilcelulose), sulfato de celulose e nitrato de celulose (Oprea et al., 2020). Além disso, é possível também extrair estruturas em escala nanométrica, ampliando as aplicações desses materiais na indústria de embalagens. De acordo com Khalil et al. (2014), as microestruturas obtidas a partir do processamento das fibras de celulose podem ser divididas em três grupos principais: nanocelulose bacteriana (BNC), celulose nanocristalina (CNC) e microfibrilas de celulose (MFCs).

As microfibrilas de celulose (MFCs) são nanoestruturas que possuem diâmetro médio inferior a 100 nm e comprimento que pode chegar a mais de 100 µm (Zambrano et al., 2020). Esse material é uma alternativa viável para substituição de polímero sintéticos devido às suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e estruturais desejáveis. Jin et al. (2021) avaliaram o recobrimento de papéis usando microfibrilas de celulose (MFCs). Os resultados demonstraram que os revestimentos de papel obtidos exibiram uma forte dependência da concentração de MFCs no comportamento reológico e exibiram menor valor de retenção de água com o aumento da adição de MFCs. Logo, a adição desse material reduziu a absorção de água e aprimorou as propriedades de resistência à tração dos papéis recobertos. Além disso, as eletromicrografias revelaram que a adição de MFCs resultou em uma superfície de recobrimento uniforme, com grande miscibilidade entre os componentes.

Yook et al. (2020) investigaram os efeitos do peso do recobrimento e o comportamento das MFCs nas propriedades de barreira dos papéis recobertos. O peso do recobrimento com as MFCs afetou o desempenho das barreiras, sendo que o peso de 10 g m⁻² foi o que apresentou melhores resultados. Além disso, as MFCs com diâmetros menores foram vantajosas para reduzir a permeação de substâncias como vapor de água e oxigênio. A maior superfície de contato entre esses materiais possibilitou a formação de mais ligações de hidrogênio entre as partículas pertencentes ao recobrimento, reduzindo a porosidade.

Segundo Ferrer et al. (2017), os nanocristais de celulose (CNC), microfibrilas de celulose (MFCs) e nanocelulose bacteriana (BNC) podem ser utilizados no recobrimento de papéis usados na confecção de embalagens para melhoria das propriedades de barreira. Os materiais nanocelulósicos exibem boas propriedades de área superficial, cristalinidade, além de alta reatividade química de superfície. Essas características credenciam e revelam o grande potencial desses materiais para melhorar as propriedades de barreira ao oxigênio e ao vapor de água quando usados em recobrimentos de papéis.

3.5 Amido

O amido é um carboidrato composto por amilose, que são moléculas lineares com forte tendência de formar hélices simples, agregando compostos hidrofóbicos que incluem moléculas lipídicas (Le et al., 2005; Conde-petit, Escher & Nuessli, 2006; Zabar, 2009). Além disso, o amido é composto por um polissacarídeo ramificado conhecido como amilopectina, em que suas ramificações são susceptíveis à formarem hélices sob efeito de ligações de hidrogênio intramoleculares (Eliasson, 1994).

O amido é um recurso natural, renovável e abundante (Xie et al., 2013; Yang et al., 2016) e tem sido empregado como matéria-prima na formulação de diversos produtos nas indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas e petrolíferas (Bie et al., 2013; Tang et al., 2015). O uso deste material tem por vantagem o baixo custo, a ampla disponibilidade e a compostabilidade total sem geração de resíduos tóxicos (Xie et al., 2013). Políticas ambientais e de gestão de resíduos, têm estimulado pesquisadores em diversos países na busca por novos materiais oriundos de fontes renováveis visando substituir os polímeros não renováveis (Nagy et al., 2017; Iamareerat et al., 2018).

O processamento do amido resulta em transformações químicas e estruturais, gerando materiais com superfícies reativas, e podendo ser aplicado para diversos fins. Estudos recentes (Lin et al., 2016; Luo et al., 2016; Chen et al., 2017) mostraram que soluções de cloreto de zinco em determinadas concentrações, como por exemplo 29,6% podem dissolver os grânulos de amido completamente. A razão para isso é que os íons Zn^{2+} podem penetrar nas estruturas internas dos grânulos de amido, enfraquecer as ligações de hidrogênio intra e intermoleculares e romper as regiões cristalinas, resultando na sua dissolução (Liu et al., 2019). Devido ao aumento da reatividade proporcionada por essas transformações, os grânulos de amido resultam na melhoria das propriedades de barreira em papéis para embalagens.

Outros estudos mostraram avanços promissores na formulação de nano-biocompósitos, com dispersão de cargas nanométricas em uma matriz de biopolímero de amido (Xie et al., 2013). Nguyen et al. (2021) estudaram a influência da aplicação de nanopartículas de amido nas propriedades microestruturais e físicas de nanocompósitos de PLA-amido, sintetizadas a partir de amido nativo por meio de hidrólise. Os resultados demonstraram grande potencial de uso desses materiais na formulação de nanocompósitos biodegradáveis sustentáveis com ácido poli (lático). Além disso, as nanopartículas de amido esféricas com tamanhos abaixo de 80 nm resultaram em maior miscibilidade com os polímeros da matriz ocasionando melhorias na estabilidade térmica e propriedades mecânicas dos nanocompósitos.

Vaezi, Asadpour & Sharifi (2019) estudaram o efeito dos nanocompósitos formados por amido catiônico (AC) e celulose nanocristalina biodegradável (CNC) como recobrimento de embalagens de papel kraft. As imagens de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FESEM) mostraram que após a aplicação da camada de recobrimento do papel com a mistura de AC e 5% de CNC, a porosidade da superfície dos papéis reduziu notavelmente. Observou-se a formação de uma camada de recobrimento AC/CNC uniforme. Além disso, o recobrimento com nanocompósitos AC/CNC aumentou o peso do recobrimento a espessura dos papéis. Neste caso, a maior concentração de CNC proporcionou maior resistência ao óleo, ao ar, à tração, além de reduzir a absorção de água e aspereza.

3.6 Quitosana

A quitosana é um biopolímero advindo da quitina, sendo amplamente disponível na natureza. A quitina é um homopolímero semi-cristalino β -(1 \rightarrow 4) ligado ao N-acetil-D-glucosamina. Este elemento é sintetizado por muitos organismos vivos e pode ser obtido a partir de fontes renováveis, principalmente por meio de resíduos resultantes do processamento industrial de animais marinhos (p. ex., cascas de caranguejo e camarão) (Bakshi et al., 2020). A partir da desacetilação da quitina, a quitosana é formada pela repetição de unidades de β -(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-D-glucose e β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-D-glucose, sendo esta última unidade correspondente à 80 % da molécula. Na fase sólida, a quitosana é semicristalina e geralmente é um polieletrólito catiônico solúvel em meio ácido, como nos ácidos acético, cítrico, fórmico, láctico, málico ou tartárico, entre outros (Cazón & Vázquez, 2019).

A quitosana é um polissacarídeo barato e disponível comercialmente. Além da sua versatilidade, esse material detém outras propriedades interessantes comercialmente, tais como: atoxicidade, renovabilidade, biodegradabilidade, biocompatibilidade, além de propriedades antibacterianas, antifúngicas e de afinidade com proteínas (Bakshi et al., 2020). Logo, vem sendo utilizada em diversos setores industriais, tais como têxtil, alimentício, agrícola, tratamento de efluentes e produtos médicos. A quitosana também tem sido utilizada pela indústria de papel, sendo aplicada no recobrimento em embalagens de alimentos, proporcionando melhorias nas propriedades dos papéis como maior resistência e flexibilidade, além de aumento da vida útil dos alimentos (Wang et al., 2018).

Estudos relataram a fabricação de filmes de quitosana aplicados em embalagens antibacterianas (Verlee, Mincke & Stevens, 2017) e filmes ativos em embalagens de alimentos (Kuorwel et al., 2015). Mustafa et al. (2014) avaliaram a aplicação de quitosana pura na formulação de filmes para embalagens de tomates. Tais elementos possibilitaram melhor conservação deste alimento quando aplicados em dimensões micrométricas. Além disso, observou-se que a adição de plastificantes e emulsificantes na composição dos filmes contribuíram para a melhoria das propriedades das embalagens como flexibilidade e durabilidade. Entretanto, algumas desvantagens são observadas como hidrofiliabilidade e retardo no amadurecimento.

Lorevice et al. (2016) estudaram a interação entre pectina e quitosana em filmes para embalagens. Os autores observaram que houve aumento na interação molecular entre esses elementos em função da natureza química (quitosana - carga positiva e pectina - carga negativa), promovendo maior estabilidade e uniformidade dos filmes, e concluíram que os compostos apresentaram propriedades compatíveis para o uso em larga escala no recobrimento de papéis para embalagens.

3.7 Proteínas

A complexidade das proteínas e a diversidade de suas diferentes frações podem ser usadas para desenvolver materiais de embalagem com propriedades funcionais que diferem significativamente daquelas dos materiais plásticos sintéticos convencionais. A maioria deles tem capacidade de formação de filmes e, devido às suas boas propriedades de barreira, são adequados para serem utilizados em embalagens. Apresentam também características de biodegradabilidade e compostabilidade, que constituem funcionalidades adequadas para o seu uso (Krochta, 1992)

As estruturas secundárias, terciárias e quaternárias das proteínas causam diferentes interações e ligações que variam em posição, tipo e energia. Essas estruturas podem ser alteradas por vários tipos de tratamentos, agentes químicos e físicos. Assim, durante a formação do filme proteico, os tratamentos e agentes geralmente são aplicados para melhorar suas propriedades (Zhang & Sablani, 2021).

Dentre as proteínas de origem animal, as que estão presentes no leite têm sido relacionadas à produção de filmes para o recobrimento de papéis. Segundo Walstra et al., (2006), as proteínas representam cerca de 3,3% dos constituintes do leite de vaca, onde as caseínas (α 1-, α 2-, β -, κ -) correspondem a 80% aproximadamente. Quando expostas ao formaldeído, as micelas

de caseína se transformam em um material semelhante a um plástico (Tucker & Johnson, 2004). Uma das características desse material é a resistência à água, por isso, sua aplicação em papéis torna-se atrativa.

Os outros 20% das proteínas do leite de vaca referem-se às soroproteínas (*whey protein* – WP), predominando a β -lactoglobulina e, em seguida, a α -lactoalbumina. Han e Krochta (2001) estudaram as propriedades físicas e o comportamento de absorção de óleo de papel revestido com WP. Os resultados demonstraram que o revestimento à base de isolado protéico de soro (*whey protein isolate* – WPI) sobre o papel produziu uma superfície lisa. Foi verificado que o aumento do peso do revestimento diminuiu a tensão de ruptura e a resistência ao rasgamento não foi alterada pelo revestimento de WPI. Além disso, houve melhoria no desempenho do material de embalagem de papel, aumentando a resistência ao óleo sem alterar significativamente suas propriedades ópticas e mecânicas.

Dentre as diversas proteínas vegetais que podem ser usadas como matéria-prima para a produção de filmes, o glúten é uma das mais estudadas e promissoras. O glúten é fornecido a partir do trigo e outros grãos relacionados, como centeio e cevada. Gliadina e glutelina são duas proteínas que formam a estrutura do glúten, estando unidas ao amido no endosperma de muitos grãos de forrageiras (Domenek et al., 2004). Guillaume et. al (2010) estudaram o efeito do revestimento de glúten de trigo em papéis comerciais. Foram realizados experimentos sem e com tratamento na superfície (com carbonato de cálcio e amido) e os resultados mostraram que a permeabilidade ao vapor de água foi reduzida com a aplicação desse revestimento, juntamente com o preenchimento do polímero natural na estrutura porosa do papel.

Outra proteína vegetal que é reconhecida e comercializada por suas propriedades filmogênicas é a zeína de milho. Os filmes à base de zeína são insolúveis em água, relativamente brilhantes e à prova de graxa. Suas propriedades de alta resistência ao vapor de água e oxigênio e sua capacidade de retenção são usadas para melhorar a vida útil dos alimentos. No entanto, a extração e purificação de zeína é relativamente cara comparadas a outras proteínas vegetais. Trezza et al. (1994) iniciaram pesquisas sobre as propriedades de barreira (graxa, vapor d'água e oxigênio) do papel revestido com zeína de milho. Os resultados demonstraram que as propriedades mecânicas e de barreira da embalagem foram melhoradas pelo recobrimento de filmes com essas proteínas.

3.8 Lipídeos

Os lipídeos são substâncias químicas derivadas de hidrocarbonetos diversificados que, ao contrário das outras classes de compostos orgânicos, não são caracterizadas por algum grupo funcional comum, e sim pela sua alta solubilidade em solventes orgânicos e baixa solubilidade em água.

Dentre os lipídios, as ceras são geralmente definidas como substâncias orgânicas hidrofóbicas contendo cadeias médias e longas de átomos de carbono, sendo classificadas em naturais ou sintéticas (Goslinska & Heinrich, 2019). São substâncias capazes de reduzir a permeabilidade à umidade em embalagens, podendo também ser usadas como recobrimento visando melhorar as propriedades do papel (Amin et al., 2021).

De acordo com Liu et al. (2021), as principais ceras naturais são as ceras de abelha, de carnaúba e de girassol. Características como ponto de fusão, temperatura de transição vítrea e temperatura mínima de formação de filme devem ser consideradas na escolha da cera e do método de aplicação mais adequado no recobrimento dos papéis.

A cera de abelha é um material fisiológico, composto por 72% de ésteres, 14% de ácidos livres e 13% de hidrocarbonetos, sendo o ácido palmítico o seu principal componente. Por se tratar de um produto natural, renovável e atóxico, o uso desse material em embalagens de alimentos já é regularizado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (Brasil, 2007), o que possibilita a sua expansão em escala industrial. Matos et al. (2019) estudaram a aplicação de emulsões de cera de abelha no recobrimento de papéis para embalagens. Os resultados mostraram que a incorporação da emulsão de cera de abelha reduziu a permeabilidade ao vapor de água em 96% em papéis com gramatura de 60 g m⁻², e em 90% em papéis com

gramatura de 80 g m⁻². Além disso, as eletromicrografias revelaram que a adição da cera de abelha foi importante para reduzir os espaços vazios nas microestruturas dos papéis.

A cera de carnaúba é um material extraído das folhas da palmeira *Copernicia prunifera*, uma planta nativa do Brasil. O processo industrial de extração pode ser realizado a partir do refino da cera bruta, obtido em processo artesanal; a partir do refino do pó; ou até mesmo, a partir do processamento da borra da cera de carnaúba originária do processamento artesanal ou industrial (Freitas et al., 2019). Por se tratar de um material hidrofóbico e o seu uso em embalagens alimentícias já ser regularizado pela ANVISA (Brasil, 2007), esse material apresenta-se como uma possível alternativa para substituição de polímeros sintéticos. Despond et al. (2005) avaliaram a incorporação de camadas de quitosana e cera de carnaúba em papéis para embalagens. Os resultados obtidos demonstraram que a adição de uma camada de cera de carnaúba sobre uma camada de quitosana, melhorou as propriedades de barreira do material, reduzindo a absorção de água e a permeabilidade de CO₂ e O₂. Tal estudo reforça a eficiência do uso de ceras no recobrimento de papéis para embalagens.

4. Considerações Finais

Os biopolímeros apresentados têm se mostrado materiais promissores, e que ainda demandam estudos aprofundados para encontrar a melhor forma de emprego, aplicação e proporção adequada, para gerar barreiras eficientes em papéis para embalagens. Devido às suas propriedades de biodegradabilidade, biocompatibilidade, por ser originado de fonte renovável e em alguns casos de baixo custo, os biopolímeros são uma alternativa inovadora para substituição de polímeros não renováveis, como aqueles à base de petróleo que causam impactos ambientais.

Os principais biopolímeros utilizados como recobrimento de barreira em embalagens de papel são derivados da celulose, amidos, quitosana ou quitina, proteínas (animal ou vegetal) e lipídeos. Por outro lado, é emergente a busca por materiais provenientes de resíduos de produtos alimentícios e commodities agrícolas (resíduos de cascas de caranguejo e camarão, por exemplo), entretanto, ainda existem lacunas no conhecimento sobre esses materiais, suas transformações/modificações e seu processamento, apresentando-se como uma área promissora a ser explorada na engenharia de biomateriais.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Lavras (Departamento de Ciências Florestais), à Universidade Federal de Viçosa (Departamento de Engenharia Florestal e Departamento de Tecnologia de Alimentos) e ao Instituto de Laticínios Cândido Tostes – EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

- Ahmad, M., Nirmal, N. P., Danish, M., Chuprom, J., & Jafarzedeh, S. (2016). Characterisation of composite films fabricated from collagen/ chitosan and collagen/soy protein isolate for food packaging applications. *RSC Advances*, 6, 82191-82204.
- Aloui, H., Baraket, K., Sendon, R., Silva, A. S., & Khwaldia, K. (2019). Development and characterization of novel composite glycerol-plasticized films based on sodium caseinate and lipid fraction of tomato pomace by-product. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 139, 128-138.
- Amin, U., Khan, M. U., Majeed, Y., Rebezov, M., Khayrullin, M., Chung, I. M., & Thiruvengadam, M. (2021). Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 183, 2184-2198.
- Aulin, C., & Ström, G. (2013). Multilayered Alkyd Resin/Nanocellulose Coatings for Use in Renewable Packaging Solutions with a High Level of Moisture Resistance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 2582–2589.

- Avena-bustillos, R. J., & Krochta, J. M. (1993). Water Vapor Permeability of Caseinate-Based Edible Films as Affected by pH, Calcium Crosslinking and Lipid Content. *J. Food Sci.*, 58, 904.
- Bakshi, P. S., Selyakumar, D.; Kadirvelu, K., & Kumar, N. S. (2020). Chitosan as an environment friendly biomaterial – a review on recent modifications and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1072-1083.
- Bie, P., Liu, P., Yu, L., Li, X., Chen, L., & Xie, F. (2013). The properties of antimicrobial films derived from poly (lactic acid)/starch/chitosan blended matrix. *Carbohydrate Polymers*, 98 (1), 959-966.
- Biji, K. B., Ravishankar, C. N., Mohan, C. O., & Srinivasa Gopal, T. K. (2015). Smart packaging systems for food applications: a review. *Journal of food science and technology*, 52 (10), 6125-6135.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 2, de 15 de janeiro de 2007. Regulamento Técnico Sobre Aditivos Alimentares. Brasília, DF, 2007.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 259, de 20 de setembro de 2002. Regulamento técnico para rotulagem de alimentos embalados. Brasília, DF, 2002.
- Cazón, P., & Vázquez, M. (2019). Applications of chitosan as food packaging materials. In *Sustainable Agriculture Reviews*, 36, 81-123.
- Chen, X., Liu, P., Shang, X., Xie, F., Jiang, H., & Wang, J. (2017). Investigation of rheological properties and conformation of cassava starch in zinc chloride solution. *Starch - Stärke*, 69(9-10), 1600384.
- Chi, K., Wang, H., & Catchmark, J. M. (2020) Sustainable starch-based barrier coatings for packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 103, 105696.
- Conde-petit, B., Escher, F., & Nuessli, J. (2006) Structural features of starch-flavor complexation in food model systems. *Trends in Food Science & Technology*, 17(5), 227-235.
- Das, P., & Tiwari, P. (2018). Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 69-77.
- Delezuk, J. A. M., Pavinatto, A., Moraes, M. L., Shimizu, F. M., Rodrigues, V. C., Campana-filho, S. P., Ribeiro, S. J. L., & Oliveira, O. N. (2017). Silk fibroin organization induced by chitosan in layer-by-layer films: Application as a matrix in a biosensor. *Carbohydrate Polymers*, 155, 146–151.
- Despond, S., Espuche, E., Cartier, N., & Domard, A. (2005). Barrier properties of paper–chitosan and paper–chitosan–carnauba wax films. *Journal of Applied Polymer Science*, 98(2), 704-710.
- Díaz-montes, E., & Castro-muñoz, R. (2021). Trends in chitosan as a primary biopolymer for functional films and coatings manufacture for food and natural products. *Polymers*, 13(5), 767.
- Domenek, S., Feuilloley, P., Gratraud, J., Morel, M. H., & Guilbert, S. (2004). Biodegradability of wheat gluten based bioplastics. *Chemosphere*, 54(4), 551-559.
- Duran, a., & kahve, H. I. (2020). The effect of chitosan coating and vacuum packaging on the microbiological and chemical properties of beef. *Meat science*, 162, 107961.
- Eliasson, A.C. (1994). Interactions between starch and lipids studied by DSC. *Thermochimica Acta*, 246(2), 343-356.
- Elsabee, M. Z., & Abdou, E. S. (2013). Chitosan based edible films and coatings: a review. *Materials Science and Engineering: C*, 33(4), 1819–1841.
- Ferfera-harrar, H., & Dairi, N. (2014). Green nanocomposite films based on cellulose acetate and biopolymer-modified nanoclays: studies on morphology and properties. *Iranian. Polymer Journal*, 23(12), 917–931.
- Ferrer, A., Pal, L., & Hubbe, M. (2017). Nanocellulose in packaging: Advances in barrier layer Technologies. *Industrial Crops and Products*, 95, 574-582.
- Freitas, C. A. S., de Sousa, P. H. M., Soares, D. J., da Silva, J. Y. G., Benjamin, S. R., & Guedes, M. I. F. (2019). Carnauba wax uses in food–A review. *Food chemistry*, 291, 38-48.
- Gontard, N., Guilbert, S., & CUQ, J. L. (1993). Water and glycerol as plasticizers affect mechanical and water vapor barrier properties of an edible wheat gluten film. *Journal of food science*, 58(1), 206-211.
- Goslinska, M.; & Heinrich, S. (2019). Characterization of waxes as possible coating material for organic aerogels. *Powder Technology*, 357, 223-231.
- Guillaume, C., Pinte, J., Gontard, & N., Gastaldi, E. (2010). Wheat gluten-coated papers for bio-based food packaging: Structure, surface and transfer properties. *Food Research International*, 43(5), 1395 – 1401.
- Gutiérrez, T.J., & Tovar, J. (2021). Update of the concept of type 5 resistant starch (RS5): Self-assembled starch V-type complexes. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 711-724.
- Han, H., & Krochta, J. M. (2001). Physical Properties and Oil Absorption of Whey-Protein-Coated Paper. *J. Food Sci.*, 66, 294.
- He, Y., Li, H., Fei, X., & Peng, L. (2021). Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications. *Carbohydrate polymers*, 252, 117156.
- Iamareerat, B., Singh, M., Sadiq, M. B., & Anal, A. K. (2018). Reinforced cassava starch based edible film incorporated with essential oil and sodium bentonite nanoclay as food packaging material. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1953-1959.

- Nagy, E.M., Coța, C., Cioica, N., Gyorgy, Z., Todica, M., & Cozar, O. (2017). FT-IR investigation of starch based composite reinforced with Miscanthus fibers. *AIP Conference Proceedings*, 1917(1), 040009.
- Imran, M., Klouj, A., revol-junelles, A. M., & Desobry, S. (2014). Controlled release of nisin from HPMC, sodium caseinate, poly-lactic acid and chitosan for active packaging applications. *Journal of Food Engineering*, 143, 178-185.
- Indriati, L., Elyani, N., & Dina, S. F. (2020). Empty fruit bunches, potential fiber source for Indonesian pulp and paper industry. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. *IOP Publishing*, 980, 012045.
- Istiqola, A., & Syafiuddin, A. (2020). A review of silver nanoparticles in food packaging technologies: Regulation, methods, properties, migration, and future challenges. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 67(11), 1942-1956.
- Jafarzadeh, S., Alias, S. K., Ariffin, F., Mahmud, S., Najafi, A., & Sheibani, S. (2017). Characterization of a new biodegradable edible film based on semolina loaded with nano kaolin. *International Food Research Journal*, 24(1), 304.
- Jin, K., Tang, Y., Liu, J., Wang, J., & Ye, C. (2021) Nanofibrillated cellulose as coating agent for food packaging paper. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 331-338.
- Khwaldia, K., Basta, A. H., Aloui, H., & El-saied, H. (2014). Chitosan caseinate bilayer coatings for paper packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 99, 508-516.
- Krishnan, V., Awana, M., Singh, A., Goswami, S., Vinutha, T., Kumar, R R., Singh, S. P., Sathyavathi, T., Sachdev, A., & Praveen, S. (2021). Starch molecular configuration and starch-sugar homeostasis: Key determinants of sweet sensory perception and starch hydrolysis in pearl millet (*Pennisetum glaucum*). *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1087-1095.
- Krochta, J. M., Singh, R. P., & Wirakartakusumah, M. A. (Eds). (1992). *Advances in Food Engineering*, CRC Press, Boca Raton.
- Kuorwel, K. K., Cran, M. J., Orbell, J. D., Buddhadasa, S., & Bigger, S. W. (2015). Review of mechanical properties, migration, and potential applications in active food packaging systems containing nanoclays and nanosilver. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14, 411-430.
- Le, B.P., Rondeau, C., & Buléon, A. (2005). Structural investigation of amylose complexes with small ligands: Helical conformation, crystalline structure and thermostability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 35(1-2), 17.
- Li, F., Mascheroni, E., & Piergiovanni, L. (2015). The potential of nanocellulose in the packaging field: a review. *Packaging Technology and Science*, 28(6), 475-508.
- Lin, M., Shang, X., Liu, P., Xie, F., Chen, X., & Sun, Y. (2016). Zinc chloride aqueous solution as a solvent for starch. *Carbohydrate Polymers*, 136, 266-273.
- Liu, C., Zheng, Z., Xi, C., & Liu, Y. (2021). Exploration of the natural waxes-tuned crystallization behavior, droplet shape and rheology properties of O/W emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 587, 417-428.
- Liu, P., Li, Y., Shang, X., & Xie, F. (2019). Starch-zinc complex and its reinforcement effect on starch-based materials. *Carbohydrate Polymers*, 206, 528-538.
- Lorevice, M. V., Otoni, C. G., Moura, M. R. D., & Mattoso, L. H. C. (2016). Chitosan nanoparticles on the improvement of thermal, barrier, and mechanical properties of high- and low-methyl pectin films. *Food Hydrocolloids*, 52, 732-740.
- Luo, Z., Zou, J., Chen, H., Cheng, W., Fu, X., & Xiao, Z. (2016). Synthesis and characterization of amylose-zinc inclusion complexes. *Carbohydrate Polymers*, 137, 314 - 320.
- Ma, W., Tang, C. H., Yang, X. Q., & Yin, S. W. (2013). Fabrication and characterization of kidney bean (*Phaseolus vulgaris L.*) protein isolate-chitosan composite films at acidic pH. *Food Hydrocolloids*, 31, 237-247.
- Ma, Z., Hu, X., & Boye, J. I. (2020). Research advances on the formation mechanism of resistant starch type III: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(2), 276 - 297.
- Maraveas, C. (2020). Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. *Polymers*, 2(5), 1127.
- Martins, C. C. N., Dias, M. C., Mendonça, M. C., Durães, A. F. S., Silva, L. E., Félix, J. R., Damásio, R. A. P., & Tonoli, G. H. D. (2021). Optimizing cellulose microfibrillation with NaOH pretreatments for unbleached Eucalyptus pulp. *Cellulose*, 28(18), 11519-11531.
- Mihalca, V., Kerezsi, A. D., Weber, A., Gruber-traub, C., Schmucker, J., Vodnar, D. C., & Pop, O. L. (2021). Protein-based films and coatings for food industry applications. *Polymers*, 13(5), 769.
- Mohd, N., Draman, S., Salleh, M., & Yusof, N. (2017) Dissolution of cellulose in ionic liquid: A review. *AIP Conference Proceedings*, 1809(1), 02003.
- Mustafa, M. A., Ali, A., Manickam, S., & Siddiqui, Y. (2014). Ultrasound-assisted chitosan-surfactant nanostructure assemblies: Towards maintaining postharvest quality of tomatoes. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2102-2111.
- Nair, A., Kansal, D., Khan, A., & Rabnawaz, M. (2022). New alternatives to single-use plastics: Starch and chitosan-graft-polydimethylsiloxane-coated paper for water-and oil-resistant applications. *Nano Select*, 3(2), 459-470.
- Nguyen, T. P. T., Nguyen, D. V., Thuc, C. N. H., Bui, Q. B., Perré, P., & Nguyen, D. M. (2021). Valorization of starch nanoparticles on microstructural and physical properties of PLA-starch nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(10), 51757.
- Oprea, M., & Voicu, S. I. (2020). Recent advances in composites based on cellulose derivatives for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116683.

- Pereira, N. R. L., Anjos, F. E., & Magnago, R. F. (2019). Resíduos lignocelulósicos da bananicultura: uma revisão sobre os processos químicos de extração da celulose. *Rev. Virtual Quím*, 11(4), 165-1.
- Plappert, S. F., Quraishi, S., Pircher, N., Mikkonen, K. S., Veigel, S., Klinger, K. M., Potthast, A., Rosenau, T., & Liebner, F. W. (2018). Transparent, Flexible, and Strong 2,3-Dialdehyde Cellulose Films with High Oxygen Barrier Properties *Biomacromolecules*, 19(7), 2969-2978.
- Rastogi, V. K., & Samyn, P. (2015). Bio-based coatings for paper applications. *Coatings*, 5(4), 887-930.
- Rocha, J. C. B., Lopes, J. D., Mascarenhas, M. C. N., Arellano, D. B., Guerreiro, L. M. R., & Cunha, R. L. (2012). Thermal and rheological properties of organogels formed by sugarcane or candelilla wax in soybean oil. *Food Research International*, 50, 318-323.
- Romanazzi, G., Feliziani, E., Baños, S. B., & Sivakumar, D. (2017). Shelf-life extension of fresh fruit and vegetables by chitosan treatment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57, 579-601.
- Sharma, S.K., Sharma, P.R., Lin, S., Chen, H., Johnson, K., Wang, R., Borge, S. W., Zhan, C., & Hsiao, B.S. (2020). Reinforcement of natural rubber latex using jute carboxycellulose nanofibers extracted using nitro-oxidation method. *Nanomaterials*, 10(4), 706.
- Shen, Z., Rajabi-abhari, A., Oh, K., Yang, G., Youn, H.J., & Lee, H.L. (2021). Improving the Barrier Properties of Packaging Paper by Polyvinyl Alcohol Based Polymer Coating—Effect of the Base Paper and Nanoclay. *Polymers*, 13(8), 1334.
- Souza, A. C., Gotoa, G. E. O., Mainardia, J. A. Coelho, A. C. V., & Tadini, C. C. (2013). Cassava starch composite films incorporated with cinnamon essential oil: antimicrobial activity, microstructure, mechanical and barrier properties. *LWT - Food Science and Technology*, 54(2), 346-352.
- Souza, M. P., Vaz, A. F. M., Cerqueira, M. A., Teixeira, J. A., Vicente, A. A., & Carneiro-da-cunha, M. G. (2015). Effect of an edible nanomultilayer coating by electrostatic self-assembly on the shelf life of fresh-cut mangoes. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 647-654.
- Sundaram, J., Pant, J., Goudie, M. J., Mani, S., & Handa, H. (2016). Antimicrobial and physicochemical characterization of biodegradable, nitric oxide-releasing nanocellulose-chitosan packaging membranes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64, 5260-5266.
- Talón, E., Trifkovic, K. T., Nedovic, V. A. Z., Bugarski, B. M., Vargas, M., Chiralt, A., & Gonzalez-Martínez, C. (2017). Antioxidant edible films based on chitosan and starch containing polyphenols from thyme extracts. *Carbohydrate Polymers*, 157, 153-1161.
- Tang, Y., Xie, F., Zhang, D., Zhu, M., Liu, L., & Liu, L. (2015). Physical properties and prebiotic activity of maize starch-based functional films. *Starch - Stärke*, 67(1-2), 124-131.
- Tanpichai, S., Witayakran, S., Woothikanokkhan, J., Srimarut, Y., Woraprayote, W., & Malila, Y. (2020). Mechanical and antibacterial properties of the chitosan coated cellulose paper for packaging applications: Effects of molecular weight types and concentrations of chitosan. *International journal of biological macromolecules*, 155, 1510-1519.
- Tian, W., Gao, X., Zhang, J., Yu, J., & Zhang, J. (2022). Cellulose nanosphere: Preparation and applications of the novel nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, 277, 118863.
- Trezza, T. A., Vergano, P. J. (1994). Grease Resistance of Corn Zein Coated Paper. *J. Food Sci.*, 59, 912.
- Tucker, N., & Johnson, M. (2004). *Low Environmental Impact Polymers*. 1. ed. [s.l.] Rapra Technology Limited Shawbury.
- Vaezi, K., Asadpour, G., & Sharifi, S. H. (2019). Effect of coating with novel bio nanocomposites of cationic starch/cellulose nanocrystals on the fundamental properties of the packaging paper. *Polymer Testing*, 80, 106080.
- Vera, P., Canellas, E., & Nerín, C. (2020). Compounds responsible for off-odors in several samples composed by polypropylene, polyethylene, paper and cardboard used as food packaging materials. *Food chemistry*, 309, 125792.
- Verlee, A., Mincke, S., & Stevens, C. V. (2017). Recent developments in antibacterial and antifungal chitosan and its derivatives. *Carbohydrate Polymers*, 164, 268-283.
- Walstra, P., Wouters, J. T. M., & Geurts, T. J. (2006). *Dairy Science and Technology*. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis Group.
- Wang, H., Guo, T., & Li, H. (2016). Evaluation of viscosity and printing quality of chitosan-based flexographic inks: The effect of chitosan molecular weight. *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 43997.
- Wang, H., Qian, J., & Ding, F. (2018). Emerging Chitosan-Based Films for Food Packaging Applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(2), 395-413.
- Wang, W., Gu, F., Deng, Z., Zhu, Y., Zhu, J., Guo, T., Song, J., & Xiao, H. (2021). Multilayer surface construction for enhancing barrier properties of cellulose-based packaging. *Carbohydrate Polymers*, 255, 17431.
- Xie, F., Pollet, E., Halley, P. J., & Avérous, L. (2013) Starch-based nano-biocomposites. *Progress in Polymer Science*, 38(10-11), 1590-1628.
- Xu, C., Lu, M., Wu, K., & Shi, J. (2021). Functionalization of nano-cellulose by coupling agent with green strategy. *Inorganic Chemistry Communications*, 134, 108939.
- Yang, G., Kong, H., Chen, Y., Liu, B., Zhu, D., Guo, L., & Wei, G. (2021). Recent advances in the hybridization of cellulose and carbon nanomaterials: Interactions, structural design, functional tailoring, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 279, 118947.
- Yang, J., Xie, F., Wen, W., Chen, L., Shang, X., & Liu, P. (2016). Understanding the structural features of high-amylose maize starch through hydrothermal treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 268-274.

Yenidoğan, S. (2020). Nanocrystalline Cellulose and Polyvinyl Alcohol Coating Application to Cardboard Packaging Papers and Investigation of the Effects on Paper Properties. *Materials Science*, 26(3), 317-322.

Yook, S., Park, H., & Park, H. (2020). Barrier coatings with various types of cellulose nanofibrils and their barrier properties. *Cellulose*, 27, 4509–4523.

Zabar, S. (2009). Studying different dimensions of amylose-long chain fatty acid complexes: Molecular, nano and micro level characteristics. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1918-1925.

Zambrano, F., Starkey, H., Wang, Y., Assis, C. A., Venditti, R., Pal, L., Jameel, H., Hubbe, M. A., Rojas, O. J., & Gonzalez, R. (2020). Using micro-and nanofibrillated cellulose as a means to reduce weight of paper products: A review. *BioResources*, 15(2), 4553-4590.

Zhang, H., & Sablani, S. (2021). Biodegradable packaging reinforced with plant-based food waste and by-products. *Current Opinion in Food Science*, 42, 61-68.

Zhu, H., Han, Z., & da-wen sun, J. (2022). Modification of cellulose from sugarcane (*Saccharum officinarum*) bagasse pulp by cold plasma: Dissolution, structure and surface chemistry analysis. *Food Chemistry*, 374, 131675.