

BIOPLÁSTICOS: UMA REVISÃO TEÓRICA SOBRE USO DE NANOCELULOSE E AMIDO DERIVADOS DE RESÍDUOS AGROALIMENTARES

Bioplastics: A Theoretical Review on the Use of Nanocellulose and Starch Derived from Agri-Food Waste

Maria Eduarda Wlodarkiewicz¹, Marcelo Luis Mignoni¹

¹ Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Engenharia de Alimentos URI Erechim. *E-mail*: mew.eduarda@gmail.com; mignoni@uricer.edu.br

Data do recebimento: 21/06/2024 - Data do aceite: 16/09/2024

RESUMO: Conhecer sobre a importância da redução das embalagens e o quanto elas impactam no meio ambiente é fundamental. Por isso, a necessidade de criação de produtos verdes, com seu ciclo de vida definido e sem gerar grandes impactos econômicos e ecológicos. Fundamentado em um estudo bibliográfico, este artigo tem como objetivo descrever a importância do uso de resíduos agroalimentares, como o brócolis e a lentilha, em pesquisas de desenvolvimento de embalagens bioplásticas. Verificou-se que o uso de compostos vegetais, tal qual a nanocelulose vegetal, devido à melhora da resistência à tração e a flexibilidade dos biofilmes, e o amido, devido às suas propriedades físico-químicas e à capacidade da amilose de formar géis e filmes, são promissores no ramo de tecnologia de novos materiais, principalmente alimentícios. Isto abre caminhos para pesquisas que enriquecem o saber teórico e prático a respeito do tema.

Palavras-chave: Brócolis. Lentilha. Revestimentos de alimentos. Subprodutos alimentares.

ABSTRACT : Understanding the importance of packaging reduction and its environmental impact is crucial, hence the need for creating green products with a defined lifecycle that minimizes economic and ecological repercussions. Based on a literature review, this article aims to describe the significance of

using agri-food waste, such as broccoli and lentil, in research on the development of bioplastic packaging. It was found that the use of plant compounds, such as vegetable nanocellulose—due to its improvement in tensile strength and flexibility in biofilms—and starch—due to its physicochemical properties and the ability of amylose to form gels and films—are promising in the field of new material technology, especially in food applications. This opens doors for researches that enrich both theoretical and practical knowledge on the subject

Keywords: Broccoli. Food by-products. Food coatings. Lentil.

Introdução

As embalagens plásticas são materiais essenciais, atualmente, para o setor alimentício. De acordo com Porta e Di Pierro (2020) o setor de embalagens é o maior campo de aplicação de plásticos, que representa cerca de 40% do rendimento global total deste material. O uso frequente de plásticos, como produtos descartáveis, se baseia em diversas características que os tornam atrativos para diversos setores, como seu peso leve, baixo custo de produção, fácil processamento e propriedades mecânicas adequadas (Chen *et al.*, 2021).

É gerada, anualmente, uma quantidade muito grande de resíduos plásticos, pois a maioria deles se decompõe no meio ambiente a um ritmo extremamente lento devido a sua estrutura molecular robusta (Ali *et al.*, 2021; Chamas *et al.*, 2020). De acordo com um relatório publicado pelo PNUMA em 2023, a poluição plástica pode ser reduzida em até 80%, até 2040, se os países e empresas se unirem em um esforço conjunto para implementar mudanças profundas nas políticas, no mercado e com investimentos em pesquisas utilizando as tecnologias já disponíveis.

As embalagens de alimentos desempenham um papel importante em garantir a segurança alimentar e reduzir o desperdício,

além de aumentar o tempo de prateleira dos produtos (Stoica *et al.*, 2020). Diante da crescente preocupação com o impacto ambiental do plástico, a busca por alternativas sustentáveis para embalagens de alimentos se intensifica (Landim *et al.*, 2016) e diversos estudos exploram o potencial de novos materiais, como amido e celulose vegetal (Pontes, 2022).

O amido se destaca como um material promissor para o desenvolvimento de embalagens de alimentos sustentáveis, devido às suas características vantajosas, como formação de filmes transparentes, atoxicidade, biodegradabilidade e abundância na natureza (Punia Bangar *et al.*, 2022). Pesquisas mostram que uma mistura de amido de milho, glicerol e gelatina formaram filmes homogêneos que foram dispostos sobre uvas durante o período de armazenamento pós-colheita, aumentando sua qualidade (Fakhouri *et al.*, 2015). Da mesma forma, a partir do amido do cará roxo, foram obtidos revestimentos que apresentaram boas propriedades físicas e, quando aplicados em maçãs por 4 semanas, contribuíram para aumentar sua vida útil (Martins da Costa *et al.*, 2020). Apesar disso, os filmes de amido apresentam algumas limitações que precisam ser superadas para viabilizar seu uso em larga escala como a hidrofobicidade, baixa resistência à tração e elasticidade e permeabilidade à água e ao oxigênio (Punia Bangar *et al.*, 2022).

A celulose é um polímero natural abundante, renovável e biodegradável que surge como uma alternativa promissora às embalagens de alimentos tradicionais de plástico. Sua versatilidade permite a criação de filmes e fibras transparentes, com propriedades adequadas para proteger os alimentos, como resistência à tração, à umidade e à permeabilidade (Aigaje; Riofrio; Baykara, 2023). Além disso, a celulose pode ser facilmente modificada quimicamente para atender a necessidades específicas, como a criação de barreiras contra gases e a adição de propriedades antimicrobianas (Punia Bangar *et al.*, 2022).

O reaproveitamento de resíduos agroalimentares, para o uso tecnológico do amido e celulose é bastante interessante, uma vez que há grande diversidade e disponibilidade de resíduos descartados, que são usadas em aplicações de baixo valor agregado, como alimentação para o gado (Otoni *et al.*, 2021).

A reutilização de resíduos e subprodutos agroalimentares como matérias-primas para a produção de biomateriais de alto valor agregado, com potencial para a fabricação de embalagens sustentáveis, pode ser uma alternativa eficaz para o setor de embalagens alcançar a sustentabilidade (Cristofoli *et al.*, 2023). Nesse contexto, a inovação, por meio da gestão eficiente e da valorização de resíduos e subprodutos da indústria alimentícia, se apresenta como uma alternativa para minimizar a geração de resíduos orgânicos, especialmente resíduos sólidos e efluentes líquidos (Gonçalves; Maximo, 2023; Visco *et al.*, 2022).

O presente trabalho tem como objetivo investigar, através de revisão de literatura, a importância da utilização de compostos, como amido e nanocelulose, dos resíduos agroalimentares para a produção de bioplásticos, demonstrando os resultados da literatura científica.

O uso de biopolímeros como embalagens de alimentos

O termo “biopolímero”, também conhecido como “bioplástico”, assume diversos significados, englobando tanto macromoléculas ativas biologicamente, como proteínas, quanto materiais poliméricos sintéticos empregados em áreas biológicas e biomédicas (Canevarolo, 2001). No contexto dos polímeros de origem biológica, apesar da crescente atenção, a terminologia carece de clareza, em parte, devido à ausência de características universalmente aceitas (Brockhaus; Petersen; Kersten, 2016). Os bioplásticos ou biopolímeros são derivados de plantas ou microrganismos ao invés de combustíveis fósseis (Singh *et al.*, 2022). São materiais cujas propriedades físicas e químicas se deterioram rapidamente quando são expostos ao ambiente, como exemplo, a lignina, o amido e a celulose (Shilpa; Basak; Meena, 2022).

É fundamental reconhecer que os bioplásticos não se restringem a um único tipo de material, mas sim abrangem uma ampla gama de matérias-primas, propriedades e aplicações (Pontes, 2022). Essa diversidade se reflete na distinção entre plásticos de base biológica e plásticos biodegradáveis. Atualmente, a produção de bioplásticos se baseia, principalmente, em culturas alimentares ou matérias-primas de primeira geração, como milho e cana-de-açúcar, ricas em carboidratos (European Bioplastics, 2023).

Os plásticos biodegradáveis são aqueles que compreendem materiais plásticos produzidos a partir de fontes renováveis ou não renováveis, mas que apresentam uma taxa de biodegradação superior aos plásticos tradicionais. Já os plásticos de base biológica derivam, parcial ou totalmente, de recursos biológicos e renováveis, como grãos, vegetais ou óleos vegetais (European Bioplastics, 2023).

Apesar do potencial promissor dos biopolímeros, sua produção ainda representa apenas 1% dos 359 milhões de toneladas de plásticos produzidos anualmente (Jones, 2020), sendo que no ano de 2021, cerca de 58% da produção de biopolímeros foram utilizados para a produção de embalagens (Interplast, 2023). Isso ocorre, devido à sua biodegradabilidade, o que reduz o impacto ambiental causado pelos plásticos convencionais, que derivam de fontes fósseis e persistem no ambiente por longos períodos (Stoica *et al.*, 2024). Além disso, os biopolímeros são não-tóxicos e possuem compatibilidade biológica, o que os torna seguros para uso em embalagens de alimentos. Além disso, esses materiais também promovem a inovação no setor de embalagens ao fornecer alternativas que atendem tanto às exigências de sustentabilidade quanto às demandas por embalagens funcionais e seguras (Dirpan; Ainani; Djalal, 2023).

Embora os termos “filmes” e “revestimentos” sejam frequentemente utilizados como sinônimos, suas aplicações na indústria alimentícia apresentam distinções que influenciam diretamente suas funções e características (Otoni *et al.*, 2017). No contexto da indústria alimentícia, tanto os revestimentos quanto os filmes se referem a camadas finas de material aplicadas à superfície de diversos alimentos, com o objetivo principal de prolongar a vida útil e preservar a qualidade do produto, reduzindo contaminantes, gases e umidade (Md Nor; Ding, 2020). No entanto, nem todos os materiais biodegradáveis são comestíveis.

Os filmes e revestimentos comestíveis são projetados para serem consumidos junto com o alimento, mas eles exigem um maior rigor na seleção de seus componentes. A composição deve ser restrita a ingredientes de grau alimentício, incluindo a matriz formadora do filme, o solvente, os plastificantes e até mesmo outros aditivos, como corantes,

aromatizantes, agentes antioxidantes e antimicrobianos (Otoni *et al.*, 2017).

A pesquisa e o desenvolvimento científico de filmes e revestimentos comestíveis, utilizando fontes naturais, já apresentou vários casos positivos que representam um passo importante para a construção de uma cadeia alimentar mais sustentável e responsável, como Siqueira e colaboradores (2021) que desenvolveram biofilmes à base de banana verde, em diferentes concentrações, junto de plastificante propilenoglicol, também com diferentes concentrações. Como resultado, obtiveram filmes com baixa taxa de transferência de vapor d'água, boa resistência mecânica, flexibilidade e transparência.

No estudo de Luchese *et al.* (2019), os pesquisadores investigaram o potencial de subprodutos do processamento de frutas e oleaginosas na produção de biofilmes comestíveis a partir de amido de mandioca. Os resultados demonstram o impacto positivo da incorporação desses materiais naturais nas propriedades dos filmes como o bagaço da jabuticaba apresentando maior flexibilidade e resistência à deformação e os subprodutos do mirtilo e da linhaça que apresentaram maior resistência à tração.

Já o estudo de Croche (2018) demonstra o grande potencial de retirada da celulose da casca de arroz como reforço em materiais compósitos. Além disso, as análises da Espectroscopia no Infravermelho, com Transformada de Fourier, indicou que não houve alterações na estrutura química da celulose.

O brócolis como fonte de celulose vegetal

O brócolis, uma planta da família da couve-flor, é cultivado em muitos lugares, principalmente em climas mais amenos (Lalla *et al.*, 2010). No Brasil, ele é mais predominante

nas regiões Sul e Sudeste, como Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais e São Paulo, sendo o último o maior produtor, de acordo com o senso de 2017 do IBGE. Em 2019, estimou-se que 13,5% da produção nacional de hortaliças, incluindo o brócolis, era perdida após a colheita (Embrapa Hortaliças, 2019). Considerando que a produção brasileira de brócolis em 2020 foi de 450 mil toneladas (Cepea, 2021), isso significaria um descarte de 60.750 toneladas por ano.

Em geral, o brócolis contém entre 2,6 a 5,2 gramas de celulose e cerca de 0,8 gramas de lignina a cada 100 gramas de alimento fresco, podendo variar sua quantidade no alimento cozido, pois o cozimento diminui a quantidade de fibras solúveis (Usda National Nutrient Database, 2024). O consumo dessas fibras alimentares impactam positivamente a composição e função da microbiota gastrointestinal humana, auxiliando na redução de doenças crônicas, como diabetes do tipo 2, e aumentando a sensação de bem-estar e disposição (Kaczmarek *et al.*, 2019).

Ao longo do ciclo de vida da planta, moléculas de celulose, lignina e hemicelulose se entrelaçam para formar as microfibrilas, que por sua vez compõem a parede celular. Essa estrutura complexa, descrita por Khalil, Bhat e Yusra em 2012, revela a correlação entre esses componentes. A celulose, presente nas fibras lignocelulósicas, encontra-se envolta por uma matriz de lignina e hemicelulose, formando um conjunto resistente. Para extrair a celulose pura é necessário realizar tratamentos específicos, devido à complexidade do material vegetal (Nagarajan *et al.*, 2021).

Para realizar a extração da celulose é necessário realizar um pré-tratamento, visando a sua purificação e homogeneização para otimizar as etapas subsequentes. No caso de materiais de origem vegetal, o objetivo principal do pré-tratamento é a remoção completa ou parcial de componentes não celulósicos, como hemicelulose e a lignina (Nagarajan *et*

al., 2021). Essa remoção facilita o acesso à celulose pura, essencial para a obtenção de um material de alta qualidade com propriedades e aplicações aprimoradas (Pontes, 2022).

O segundo estágio da produção de nanocelulose envolve a desintegração da celulose purificada em seus componentes microfibrilados ou cristalinos. Diversos métodos podem ser empregados para isolar essas nanopartículas, podendo ser tratamentos mecânicos, hidrólise ácida ou hidrólise enzimática (Zinge; Kandasubramanian, 2020). A escolha do método ideal depende das características desejadas para as nanopartículas, como tamanho, cristalinidade e propriedades superficiais.

Esse alto teor de celulose, combinado com a busca por soluções sustentáveis, renováveis e economicamente viáveis, além da redução do desperdício da matéria-prima, impulsionam uma vasta quantidade de pesquisas focadas na extração da celulose e no isolamento dos nanocristais. Já que, as fibras lignocelulósicas apresentam-se como uma promissora fonte de matéria prima para aplicações tecnológicas a novos materiais (Tabela I).

Em 2022, um estudo sobre os resíduos alimentares no mundo, para a produção de materiais avançados, cita a couve-flor e o brócolis como sendo 43% do total desperdiçado, que podem ser utilizados em pesquisas para utilização da celulose (Li *et al.*, 2022). Em 2023, uma pesquisa utilizou polifenóis extraídos das folhas de brócolis para produzir emulsões de Pickering, dispersões estabilizadas por partículas sólidas de origem orgânica ou inorgânica. As emulsões apresentaram boa estabilidade física, além de melhorar a estabilidade oxidativa (Cao *et al.*, 2023). Esses achados sugerem que nanopartículas de polifenóis podem atuar como emulsificantes seguros para alimentos, estabilizando emulsões e inibindo a oxidação lipídica.

Os pesquisadores Alshehri *et al.*, em 2024 utilizaram o extrato purificado de sementes de broto de brócolis no desenvolvimento de filmes biodegradáveis para embalar manteiga, feitos a partir da combinação de carboximetilcelulose e álcool polivinílico. Os filmes apresentaram boa estabilidade térmica, e a adição do extrato de broto de brócolis melhorou a capacidade de preservar a acidez, o valor TBARS (substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico), o índice de peróxido e a coloração total da manteiga durante o armazenamento refrigerado. Em 2021, uma pesquisa demonstrou o potencial do uso da celulose extraída do bagaço de maçã e da couve-flor na produção de filmes biodegradáveis (Wang; Zhao, 2021). Os filmes de celulose

obtidos apresentaram alta transparência e boa resistência mecânica. Este estudo trouxe novos entendimentos sobre a conversão de subprodutos do processamento de frutas e legumes em celuloses de alta qualidade, abrindo caminho para sua aplicação em embalagens sustentáveis.

A lentilha como fonte de amido

A lentilha é um dos alimentos mais antigos da humanidade. Desde, aproximadamente, 7000 a.C. já era cultivada no Sudoeste da Ásia. Ela é rica em nutrientes e possui baixo índice glicêmico, sendo uma leguminosa

Tabela I – Trabalhos de literatura sobre a utilização de brócolis para o desenvolvimento de novos materiais

Autores	Títulos das publicações	Ano da publicação
Taoran Wang, Yanyun Zhao	Optimization of bleaching process for cellulose extraction from apple and kale pomace and evaluation of their potentials as film forming materials.	2021
Haoxin Li, Man Zhou, Abu ElGasim Ahmed Yagoub Mohammed, Li Chen, Cunshan Zhou	From fruit and vegetable waste to degradable bioplastic films and advanced materials: A review.	2022
Yinjuan Cao, Zhi-xuan Zang, Li Zhang, Guangxing Han, Qunli Yu, Ling Han	Hydroxypropyl methyl cellulose/soybean protein isolate nanoparticles incorporated broccoli leaf polyphenol to effectively improve the stability of Pickering emulsions.	2023
Azizah A. Alshehri, Yahya S. Hamed, Reham M. Kamel, Samar M.S. Shawir, Hazem Sakr,	Enhanced physical properties, antioxidant and antibacterial activity of bio-composite films composed from carboxymethyl cellulose and polyvinyl alcohol incorporated with broccoli sprout seed extract for butter packaging.	2024
Mostafa Ali, Amin Ammar, Mohamed N. Saleh, Enas El-Fadly, Mohamed Abdelbaset Salama, Mohamed Abdin		

popular na culinária mundial. Estima-se que o Brasil desperdice cerca de 30% da sua produção anual de lentilha, o que equivale a aproximadamente 120 mil toneladas (Embrapa Soja, 2022). Essa perda ocorre em diversas etapas da cadeia produtiva, desde a colheita até o consumo final.

A lentilha apresenta em sua composição dois tipos de moléculas de amido, amilose e aminopectina, componentes cruciais para diversas propriedades funcionais (Wang *et al.*, 2014). Estudos revelam que a lentilha apresenta teores relativamente baixos de amilose, variando entre 17% e 25% do total de amido. Em contraste, a aminopectina representa a maior fração, compondo 75% a 83% (Mahalaxmi *et al.*, 2022). Essa composição influencia, significativamente, a estrutura e as propriedades do amido, como a alta gelatinização e a resistência à retrogradação (Wang *et al.*, 2014).

O isolamento e purificação do amido da lentilha podem ser realizados através do método úmido, um processo simples e eficiente que abre caminho para diversas aplicações. Através da hidratação, moagem, filtração, sedimentação, decantação, lavagem e secagem, o amido é separado do farelo e obtido em sua forma pura (Wang *et al.*, 2014). Otimizações no processo, como o tempo de hidratação, a moagem eficiente e a filtragem minuciosa, garantem a qualidade e o rendimento do amido extraído. Com isso, a viabilidade do amido da lentilha como matéria-prima para a produção de filmes resistentes reside em suas propriedades físico-químicas, combinadas com a capacidade da amilose de formar géis e filmes, como apresentado nas pesquisas a seguir.

Em 2006, um estudo investigou a extração de proteína de semente de lentilha para a produção de filmes comestíveis, avaliando suas propriedades mecânicas, ópticas e de barreira (Bamdad; Goli; Kadivar, 2006). Os

resultados mostraram que os filmes apresentavam boas características mecânicas, permeabilidade adequada ao vapor de água e boa solubilidade. Comparado a outros filmes comestíveis de proteínas vegetais, como os derivados de soja e milho, o filme de lentilha demonstrou desempenho equivalente. Além disso, o valor de % E (alongamento na ruptura) foi superior ao do celofane, indicando maior flexibilidade.

No ano de 2019, um estudo avaliou o desenvolvimento e as propriedades físico-químicas, térmicas e mecânicas de filmes comestíveis à base de amido de abóbora, lentilha e quinoa (Pająk; Przetaczek-Rożnowska; Juszczak, 2019). Os resultados mostraram que a origem botânica do amido influencia, significativamente, as propriedades dos filmes. Filmes de amido de lentilha apresentaram menor solubilidade, enquanto os de abóbora exibiram maior capacidade de inchaço. Todos os filmes testados apresentaram uma permeabilidade ao vapor de água superior à do poliestireno (PS). O estudo concluiu que amidos de fontes não convencionais, como abóbora, lentilha e quinoa, são alternativas promissoras para a produção de filmes comestíveis, comparáveis aos amidos tradicionais.

Um estudo sobre o desenvolvimento de biopolímeros de quitosana e κ -carragenina, enriquecidos com aditivos de lentilha preta beluga, mostrou que os filmes atingiram melhorias significativas nos parâmetros mecânicos dos filmes e na permeabilidade ao vapor de água (Dordevic *et al.*, 2024). Os resultados indicam que esses filmes representam uma alternativa promissora às embalagens baseadas em combustíveis fósseis, tanto para preservar quanto para monitorar a frescura dos alimentos.

Uma pesquisa examinou como os processos de extrusão/termocompressão e moldagem por fundição, juntamente com a

adição de proteína de lentilha, influenciam as propriedades físico-químicas de biofilmes à base de amido (Ochoa-Yepes *et al.*, 2019). Os filmes de amido apresentam alta sensibilidade à água, impactando suas propriedades mecânicas e de barreira. O processo de extrusão/termocompressão aumentou em 90% a resistência mecânica dos filmes comparados à moldagem por fundição e reduziu o teor de umidade, solubilidade em água e permeabilidade ao vapor de água em 35%, 23% e 50%, respectivamente. Os filmes se mostraram termicamente estáveis até 240°C e biodegradaram em 5 semanas, sendo alternativas eficazes para melhorar as desvantagens dos biofilmes à base de amido.

Para superar as limitações do amido isolado, a união com outros biopolímeros, como a celulose, surge como uma solução promissora (Punia Bangar *et al.*, 2022). A união estratégica desses materiais pode resultar em compósitos poliméricos com características, como resistência mecânica aprimorada, barreira contra gases e umidade, propriedades ópticas otimizadas e biodegradabilidade.

Bioplásticos à base de amido e nanocelulose

A busca por materiais em escala nanométrica impulsiona a indústria e a comunidade científica a desenvolverem novos produtos celulósicos. Em uma pesquisa no site *Science Direct* pode-se observar que entre os anos 2020 a 2024, houve cerca de 12.180 mil artigos com as palavras “*starch*”, “*biopolymer*” e “*cellulose*”. Já com o conjunto de palavras “*starch*”, “*nanocellulose*” e “*biopolymer*” houve cerca de 2.280 mil publicações. Comparando as datas, somente no ano de 2020 tiveram cerca de 256 publicações, já no ano de 2024 tiveram cerca de 624, ambas usando o último conjunto de palavras. Isso mostra que ao longo dos anos, as pesquisas sobre o

tema estão ganhando mais atenção por parte da comunidade científica, porém, ainda tem um longo caminho a percorrer.

Os materiais à base de amido têm uma ampla gama de aplicações em diversos setores, como biomateriais em áreas biomédicas (Sarder *et al.*, 2022), sistemas de entrega de nutracêuticos (Sun *et al.*, 2023), embalagens (Onyeaka *et al.*, 2022), aditivos na indústria de papel (Khaksaar; Jalali Torshizi; Hamzeh, 2022) e isolantes térmicos (Druel *et al.*, 2017). No entanto, a utilização do amido nativo apresenta desafios significativos, incluindo sua variabilidade estrutural, insolubilidade em água fria e limitações de decomposição quando submetido à reaquecimento ou em condições ácidas (Sarder *et al.*, 2022). Para enfrentar essas dificuldades, diversas modificações físicas, químicas e enzimáticas foram exploradas, com o intuito de aprimorar as propriedades funcionais do amido e facilitar sua aplicação em diferentes contextos (Pantic *et al.*, 2024).

As características dos materiais à base de amido são, frequentemente, ajustadas através das condições de processamento, que englobam a origem do amido, a concentração do biopolímero, a proporção entre amilose e amilopectina, além do grau de gelatinização (Dogenski *et al.*, 2020). Outra estratégia para modificar as propriedades do amido envolve sua combinação com outros biopolímeros, permitindo que as propriedades do biopolímero adicional impactem, de maneira benéfica, as características do amido nativo (Pantic *et al.*, 2024).

Através de processos hidrolíticos, a celulose presente em biomassas vegetais é transformada em nanocelulose, na forma de nanocristais ou nanofibrilas, utilizando ácidos ou enzimas (Pontes, 2022). A capacidade da celulose de reforçar outros materiais reside em sua natureza semicristalina, onde longas cadeias de moléculas se organizam em re-

giões cristalinas. Essa organização rígida é resultado de um forte sistema de ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila presentes na molécula principal da celulose, criando uma rede resistente (Gutiérrez; Alvarez, 2017).

Os nanocristais de celulose se destacam por suas propriedades, como o alto desempenho mecânico. Essa característica os torna candidatos promissores para uma ampla gama de aplicações, impulsionando pesquisas e investimentos em diversos setores (Gutiérrez; Alvarez, 2017). Um dos principais usos dos nanocristais é como nanoaditivo para melhorar o comportamento de intumescimento de filmes de amido. Essa característica os torna promissores para diversas aplicações, como na produção de embalagens biodegradáveis e resistentes ao fogo, além de outros materiais com propriedades aprimoradas (Ilyas *et al.*, 2018).

O uso dos nanocristais de celulose, em um material, depende da dispersão homogênea na matriz polimérica. Essa dispersão uniforme garante que as propriedades, como alta resistência e rigidez, sejam aproveitadas ao máximo. Durante o processamento do material, os nanocristais se “fixam” na matriz, como se estivessem cimentados. No entanto, a forte tendência à autoagregação dos nanocristais de celulose, devido à alta densidade de grupos hidroxila em sua superfície, pode dificultar a dispersão homogênea. Este processo de agregação é facilitado quando a área da superfície específica do meio aumenta e o tamanho da partícula diminui (Ilyas *et al.*, 2018).

Embora os nanocristais de celulose sejam naturalmente hidrofílicos, sua adição aos filmes pode levar a uma redução na absorção de água e no coeficiente de difusão de água. Isso ocorre devido à formação de uma rede interpenetrante de nanocristais na matriz, que impede a penetração da água e aumenta

o caminho de difusão (Ilyas *et al.*, 2018). Um exemplo disso, é o trabalho de Bangar e colaboradores (2022), que ao incorporar nanocristais de celulose de videiras Kudzu, em filmes de amido de milho em concentrações entre 1% e 7%, resultou em uma dispersão homogênea dos nanocristais na matriz de amido, com efeitos positivos nas propriedades dos biofilmes.

Um método de processamento, em um estudo realizado em 2024, produziu aerogéis de amido com áreas de superfície até 30% superiores, ao incorporar nanocelulose, melhorando suas propriedades texturais e resistência à degradação (Pantic *et al.*, 2024). O aumento do teor de celulose melhorou a estabilidade em água e a capacidade de sorção. Embora a impregnação supercrítica tenha reduzido as áreas de superfície, a estrutura porosa foi mantida. Pesquisas futuras focarão em estudos visando às aplicações em saúde e preservação de alimentos, além de explorar diferentes tipos de amidos e melhorar as propriedades mecânicas dos aerogéis.

Já, as nanofibrilas de celulose conquistaram atenções por suas propriedades únicas, diretamente relacionadas à sua dimensão nanométrica. As nanofibrilas são repletas de atributos excepcionais, como alta resistência mecânica e rigidez, baixa densidade, biodegradabilidade, alta área superficial e propriedades ópticas (Gutiérrez; Alvarez, 2017; Jamróz; Kulawik; Kopel, 2019). Assim como os nanocristais de celulose, as nanofibrilas também apresentam vantagens econômicas consideráveis. Sua produção, a partir de fontes renováveis, como madeira, fibras vegetais e resíduos agrícolas, as tornam materiais sustentáveis e de baixo custo, impulsionando sua viabilidade comercial (Pontes, 2022).

De maneira geral, é difícil obter estruturas fibriladas totalmente cristalinas. Essa característica contribui para o aumento do interesse

pela nanocelulose fibrilada. Ao ser inserida em matrizes poliméricas, otimiza a rigidez e a resistência mecânica (Jamróz; Kulawik; Kopel, 2019). Além disso, a nanocelulose fibrilada possui uma alta área superficial e capacidade de formar redes tridimensionais viscosas em baixas concentrações. A rede viscosa distribui uniformemente as cargas mecânicas, aumentando a rigidez e a resistência à tração dos materiais reforçados. Aliás, a nanocelulose fibrilada também apresenta alta capacidade de retenção de umidade, o que a torna útil para aplicações, como controle de umidade em produtos e na adsorção de poluentes (Jamróz; Kulawik; Kopel, 2019).

Entre as pesquisas observadas (Tabela II), o trabalho de Syafiq e colaboradores, em 2023, apresentou um biopolímero de nanocelulose e amido do dendezeiro com incorporação do óleo essencial de canela, onde o objetivo era investigar as propriedades morfológicas, de barreira à água e à

biodegradabilidade do material. A partir da pesquisa, eles concluíram que a absorção de água nos filmes aumentou com a concentração do plastificante, assim como a permeabilidade ao vapor de água (PVA) e a solubilidade dos plastificantes, devido ao alto teor de água. Todos os filmes se degradaram completamente após 12 dias, confirmando sua biodegradabilidade. A variação dos plastificantes não afetou a atividade antibacteriana do óleo essencial de canela (CEO) na solução filmogênica. Assim, os compósitos de biopolímero de CEO, nanocelulose de dendê e amido demonstram bom potencial para aplicações em embalagens de alimentos.

Ainda no ano de 2023, uma pesquisa desenvolveu filmes de embalagem de alimentos inteligentes a partir de amido subcrítico modificado com betalaína de beterraba como biossensor de pH em carne de frango (Surenthiran *et al.*, 2023). Análises confirmaram a perda de cristalinidade e redução do peso

Tabela II – Trabalhos de literatura sobre a utilização de amido e celulose para o desenvolvimento de novos materiais.

Autores	Títulos das publicações	Ano da publicação
Syafiq, R. M. O. ; Sapuan, S. M. ; Mohd Zuhri, M. Y. M. ; Othman, S. H. ; Ilyas, R. A.	Morphological, water barrier and biodegradable properties of sugar palm nanocellulose/starch biopolymer composites incorporated with cinnamon essential oils.	2023
Duraiarasan Surendhiran, Vikash Chandra Roy, Truc Cong Ho, Jin-Seok Park, Seung-Chan Lee, Byung-Soo Chun	Smart packaging film prepared from subcritical water-modified oat starch and betalain of beetroot extract reinforced with cellulose nanofibrils.	2023
Sreekanth K., Sharath K.P., Midhun Dominic C.D, Divya Mathew, Radhakrishnan E.K.	Microbial load reduction in stored raw beef meat using chitosan/starch-based active packaging films incorporated with cellulose nanofibers and cinnamon essential oil.	2024
Liping Wang, Yukun Li, Lei Ye, Chaohui Zhi, Tao Zhang, Ming Miao	Development of starch-cellulose composite films with antimicrobial potential.	2024

molecular, mas as propriedades mecânicas foram aprimoradas utilizando nanofibrilas de celulose. A embalagem foi eficaz no monitoramento da deterioração do frango e se mostrou uma alternativa ecológica em embalagens alimentícias.

No ano de 2024, um estudo desenvolveu um filme à base de quitosana e amido, incorporando óleo essencial de canela e nanofibras de celulose para embalagens ativas [55]. Os resultados indicaram que a adição desses componentes melhora as propriedades antimicrobianas e físicas do filme, que se mostrou eficaz contra *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, reduzindo a carga bacteriana em carne bovina armazenada. As análises FE-SEM e FT-IR confirmaram a morfologia porosa e as interações moleculares do filme. Assim, o material apresenta promissoras aplicações na indústria de embalagens de alimentos.

Também no ano de 2024, um estudo avaliou filmes antibacterianos à base de amido reforçados com nanocristais de celulose de chá preto (Wang *et al.*, 2024). Os filmes incorporaram quitosana, ϵ -polilisina e nanopartículas de óxido de zinco, apresentando superfície lisa e alta transmitância de luz. A combinação dos compósitos e dos agentes antibacterianos melhorou as propriedades de barreira à água e ao oxigênio. O filme com quitosana teve a menor solubilidade e a maior resistência à tração. A eficácia antibacteriana foi mais pronunciada contra *E. coli* do que contra *S. aureus*. O estudo propõe um novo padrão para o desenvolvimento de

materiais de embalagem sustentáveis, unindo reciclagem de resíduos naturais e tecnologia avançada.

Conclusão

Esta revisão se propôs a desvendar o potencial dos filmes de amido reforçados com nanocelulose, compreendendo sua relevância e sua presença no mercado atual. O objetivo era demonstrar como essa tecnologia, aliada ao uso de resíduos agroalimentares, até então descartados, pode ser inovadora e capaz de revolucionar diversos setores.

Apesar das vantagens, devido à relevância dos biopolímeros de amido reforçados com nanocelulose, como um produto inovador e promissor para o mercado, a produção em larga escala de biopolímeros de amido e celulose ainda enfrenta desafios, como custos de produção relativamente altos e a necessidade de aprimorar suas propriedades para atender às demandas específicas de diferentes aplicações, principalmente industriais.

No entanto, na comunidade científica há intensas pesquisas e investimentos na área, que impulsionam o desenvolvimento de biopolímeros de amido e celulose, onde estão cada vez mais eficientes e competitivos. A perspectiva é que esses materiais se tornem uma alternativa viável e sustentável aos plásticos tradicionais, contribuindo para impulsionar a sustentabilidade e a criação de soluções para os desafios do mundo atual.

REFERÊNCIAS

CHEN, Y.; AWASTHI, A. K.; WEI, F.; TAN, Q.; LI, J. Single-Use Plastics: Production, Usage, Disposal, and Adverse Impacts. *Sci. Total Environ.*, v. 752, p. 141772, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>.

- CHAMAS, A.; MOON, H.; ZHENG, J.; QIU, Y.; TABASSUM, T.; JANG, J. H.; ABU-OMAR, M.; SCOTT, S. L.; SUH, S. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, v. 8, n. 9, p. 3494-3511, 2020. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>.
- AIGAJE, E.; RIOFRIO, A.; BAYKARA, H. Processing, Properties, Modifications, and Environmental Impact of Nanocellulose/Biopolymer Composites: A Review. *Polymers (Basel)*, v. 15, n. 5, 1219, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15051219>.
- ALI, S. S.; ELSAMAHY, T.; KOUTRA, E.; KORAROS, M.; EL-SHEEKH, M.; ABDELKARIM, E. A.; ZHU, D.; SUN, J. Degradation of Conventional Plastic Wastes in the Environment: A Review on Current Status of Knowledge and Future Perspectives of Disposal. *Sci. Total Environ.*, v. 771, p. 144719, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>.
- ALSHEHRI, A. A.; HAMED, Y. S.; KAMEL, R. M.; SHAWIR, S. M. S.; SAKR, H.; ALI, M.; AMMAR, A.; SALEH, M. N.; EL. FADLY, E.; SALAMA, M. A. Enhanced Physical Properties, Antioxidant and Antibacterial Activity of Bio-Composite Films Composed from Carboxymethyl Cellulose and Polyvinyl Alcohol Incorporated with Broccoli Sprout Seed Extract for Butter Packaging. *Int. J. Biol. Macromol.*, v. 255, p. 128346, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128346>.
- BAMDAD, F.; GOLI, A. H.; KADIVAR, M. Preparation and Characterization of Proteinous Film from Lentil (*Lens Culinaris*). *Food Res. Int.*, v. 39, n. 1, p.106-111, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.06.006>.
- BROCKHAUS, S.; PETERSEN, M.; KERSTEN, W. A Crossroads for Bioplastics: Exploring Product Developers' Challenges to Move beyond Petroleum-Based Plastics. *J. Clean. Prod.*, v. 127, p.84-95, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.003>.
- CANEVAROLO, S. V. J. *Ciência Dos Polímeros: Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros*, 2nd ed.; 2001.
- CAO, Y.; ZANG, Z.; ZHANG, L.; HAN, G.; YU, Q.; HAN, L. Hydroxypropyl Methyl Cellulose/Soybean Protein Isolate Nanoparticles Incorporated Broccoli Leaf Polyphenol to Effectively Improve the Stability of Pickering Emulsions. *Int. J. Biol. Macromol.*, v. 250, p. 126269, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126269>.
- CEPEA. Produção de brócolis no Brasil sobe 11,2% em 2020 <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/174076/1/4944.pdf>.
- CRISTOFOLI, N. L.; LIMA, A. R.; TCHONKOUANG, R. D. N.; QUINTINO, A. C.; VIEIRA, M. C. Advances in the Food Packaging Production from Agri-Food Waste and By-Products: Market Trends for a Sustainable Development. *Sustainability*, v.15, n. 7, p.6153, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15076153>.
- DIRPAN, A.; AINANI, A. F.; DJALAL, M. A Review on Biopolymer-Based Biodegradable Film for Food Packaging: Trends over the Last Decade and Future Research. *Polymers (Basel)*, v.15, n.13, p. 2781, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15132781>.
- DOGENSKI, M.; NAVARRO-DÍAZ, H. J.; DE OLIVEIRA, J. V.; FERREIRA, S. R. S. Properties of Starch-Based Aerogels Incorporated with Agar or Microcrystalline Cellulose. *Food Hydrocoll.*, v.108, p.106033, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106033>.
- DORDEVIC, D.; GABLO, N.; DORDEVIC, S.; TREMLOVA, B.; BUDINA, J.; SEDLACEK, P.; VAPENKA, L. Development of Active PH-Sensitive Biodegradable Films Based on Chitosan and κ -Carrageenan Biopolymers Enriched in Beluga Black Lentil Additives. *Food Hydrocoll.*, 156, p. 110255, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110255>.
- DRUEL, L.; BARDL, R.; VORWERG, W.; BUDTOVA, T. Starch Aerogels: A Member of the

Family of Thermal Superinsulating Materials. **Biomacromolecules**, v. 18, n. 12, p.4232-4239, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.7b01272>.

EMBRAPA Hortaliças. Desperdício de hortaliças no Brasil chega a 13,5% <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/415584/manual-de-perdas-pos-colheita-em-frutos-e-hortaliças>.

EMBRAPA SOJA. Produção de lentilhas, um bom negócio para o Brasil? <https://blogs.canalrural.com.br/embrasoja/2022/09/05/producao-de-lentilhas-um-bom-negocio-para-o-brasil/>.

European Bioplastics. Renewable feedstock <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/feedstock/>.

FAKHOURI, F. M.; MARTELLI, S. M.; CAON, T.; VELASCO, J. I.; MEI, L. H. I. Edible Films and Coatings Based on Starch/Gelatin: Film Properties and Effect of Coatings on Quality of Refrigerated Red Crimson Grapes. **Postharvest Biol. Technol.**, v.109, p.57-64, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.015>.

GONÇALVES, M. L. M. B. B.; MAXIMO, G. J. Circular Economy in the Food Chain: Production, Processing and Waste Management. **Circ. Econ. Sustain.**, v. 3, n. 3, p.1405-1423, 2023. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00243-0>.

GUTIÉRREZ, T. J.; ALVAREZ, V. A. Cellulosic Materials as Natural Fillers in Starch-Containing Matrix-Based Films: A Review. **Polym. Bull.**, v. 74, n.6, p.2401-2430, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1814-0>.

ILYAS, R. A.; SAPUAN, S. M.; SANYANG, M. L.; ISHAK, M. R.; ZAINUDIN, E. S. Nanocrystalline Cellulose as Reinforcement for Polymeric Matrix Nanocomposites and Its Potential Applications. A Review. **Curr. Anal. Chem.**, v.14, n. 3, p.203-225, 2018. <https://doi.org/10.2174/1573411013666171003155624>.

INTERPLAST. Em 2021, cerca de 58% dos bioplásticos foram utilizados para produzir embalagens <https://www.interplast.pt/Artigos/466396-Em-2021-cerca-de-58-por-ciento-dos-bioplasticos-foram-utilizados-para-produzir-embalagens.html>.

JAMRÓZ, E.; KULAWIK, P.; KOPEL, P. The Effect of Nanofillers on the Functional Properties of Biopolymer-Based Films: A Review. **Polymers (Basel)**, v.11, n. 4, p. 675, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11040675>.

JONES, F. **A promessa dos Bioplásticos**. <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-promessa-dos-bioplasticos/>.

K., S.; K.P., S.; C.D., M. D.; MATHEW, D.; E.K., R. Microbial Load Reduction in Stored Raw Beef Meat Using Chitosan/Starch-Based Active Packaging Films Incorporated with Cellulose Nanofibers and Cinnamon Essential Oil. **Meat Sci.**, v. 216, p. 109552, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109552>.

KACZMAREK, J. L.; LIU, X.; CHARRON, C. S.; NOVOTNY, J. A.; JEFFERY, E. H.; SEIFRIED, H. E.; ROSS, S. A.; MILLER, M. J.; SWANSON, K. S.; HOLSCHER, H. D. Broccoli Consumption Affects the Human Gastrointestinal Microbiota. **J. Nutr. Biochem.**, 63, 27-34, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2018.09.015>.

KHAKSAAR, A. B.; JALALI TORSHIZI, H.; HAMZEH, Y. **Valorization and Development of Acorn Starch as Sustainable and High-Performance Papermaking Additive for Improving Bagasse Pulp and Paper Properties**. Waste and Biomass Valorization, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01912-9>.

LALLA, J. G. DE; LAURA, V. A.; RODRIGUES, A. P.; SEABRA JÚNIOR, S.; SILVEIRA, D. S. DA; ZAGO, V. H.; DORNAS, M. F. Competição de Cultivares de Brócolos Tipo Cabeça Única Em Campo Grande. **Hortic. Bras.**, v. 28, n. 3, p. 360-363, 20106 <https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000300020>.

- LANDIM, A. P. M.; BERNARDO, C. O.; MARTINS, I. B. A.; FRANCISCO, M. R.; SANTOS, M. B.; MELO, N. R. DE. Sustentabilidade Quanto Às Embalagens de Alimentos No Brasil. **Polímeros**, v. 26 (spe), p.82-92, 2016. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1897>.
- LI, H.; ZHOU, M.; MOHAMMED, A. E. A. Y.; CHEN, L.; ZHOU, C. From Fruit and Vegetable Waste to Degradable Bioplastic Films and Advanced Materials: A Review. **Sustain. Chem. Pharm.**, v.30, p.100859, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100859>.
- MAHALAXMI, S.; HIMASHREE, P.; MALINI, B.; SUNIL, C. K. Effect of Microwave Treatment on the Structural and Functional Properties of Proteins in Lentil Flour. **Food Chem. Adv.**, v. 1, p.100147, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100147>.
- MARTINS DA COSTA, J. C.; LIMA MIKI, K. S.; DA SILVA RAMOS, A.; TEIXEIRA-COSTA, B. E. Development of Biodegradable Films Based on Purple Yam Starch/Chitosan for Food Application. **Heliyon**, v. 6, n. 4, p.e03718, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03718>.
- MD NOR, S.; DING, P. Trends and Advances in Edible Biopolymer Coating for Tropical Fruit: A Review. **Food Res. Int.**, 134, 109208, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109208>.
- NAGARAJAN, K. J.; RAMANUJAM, N. R.; SANJAY, M. R.; SIENGCHIN, S.; SURYA RAJAN, B.; SATHICK BASHA, K.; MADHU, P.; RAGHAV, G. R. A Comprehensive Review on Cellulose Nanocrystals and Cellulose Nanofibers: Pretreatment, Preparation, and Characterization. **Polym. Compos.**, v. 42, n. 4, p.1588-1630, 2021. <https://doi.org/10.1002/pc.25929>.
- OCHOA-YEPES, O.; DI GIOGIO, L.; GOYANES, S.; MAURI, A.; FAMÁ, L. Influence of Process (Extrusion/Thermo-Compression, Casting) and Lentil Protein Content on Physicochemical Properties of Starch Films. **Carbohydr. Polym.**, v. 208, p. 221-231, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.030>.
- ONYEAKA, H.; OBILEKE, K.; MAKAKA, G.; NWOKOLO, N. Current Research and Applications of Starch-Based Biodegradable Films for Food Packaging. **Polymers (Basel)**, v.14, n. 6, p.1126, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14061126>.
- OTONI, C. G.; AVENA-BUSTILLOS, R. J.; AZEREDO, H. M. C.; LOREVICE, M. V.; MOURA, M. R.; MATTOSO, L. H. C.; MCHUGH, T. H. Recent Advances on Edible Films Based on Fruits and Vegetables – A Review. **Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.**, 16 (5), 1151-1169, 2017. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12281>.
- OTONI, C. G.; AZEREDO, H. M. C.; MATTOS, B. D.; BEAUMONT, M.; CORREA, D. S.; ROJAS, O. J. The Food–Materials Nexus: Next Generation Bioplastics and Advanced Materials from Agri-Food Residues. **Adv. Mater.**, v. 33, n. 43, 2021. <https://doi.org/10.1002/adma.202102520>.
- PAJĄK, P.; PRZETACZEK-ROŻNOWSKA, I.; JUSZCZAK, L. Development and Physicochemical, Thermal and Mechanical Properties of Edible Films Based on Pumpkin, Lentil and Quinoa Starches. **Int. J. Biol. Macromol.**, v.138, p.441-449, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.074>.
- PANTIĆ, M.; NOWAK, M.; LAVRIČ, G.; KNEZ, Ž.; NOVAK, Z.; ZIZOVIC, I. Enhancing the Properties and Morphology of Starch Aerogels with Nanocellulose. **Food Hydrocoll.**, 156, 110345, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110345>.
- PONTES, K. L. **Nanocelulose Como Reforço Em Filmes de Amido Para Aplicação Em Embalagens Alimentícias - Uma Revisão**, Universidade Federal do Amazonas, 2022.
- PUNIA BANGAR, S.; WHITESIDE, W. S.; DUNNO, K. D.; CAVENDER, G. A.; DAWSON, P.; LOVE, R. Starch-Based Bio-Nanocomposites Films Reinforced with Cellulosic Nanocrystals Extracted from Kudzu (Pueraria Montana) Vine. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 203, p. 350-360, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.133>.
- SARDER, R.; PINER, E.; RIOS, D. C.; CHACON, L.; ARTNER, M. A.; BARRIOS, N.;

- Argyropoulos, D. Copolymers of Starch, a Sustainable Template for Biomedical Applications: A Review. **Carbohydr. Polym.**, v. 278, p.118973, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118973>.
- SHILPA; BASAK, N.; MEENA, S. S. Microbial Biodegradation of Plastics: Challenges, Opportunities, and a Critical Perspective. *Front. Environ. Sci. Eng.*, v. 16, n. 12, 161, 20226. <https://doi.org/10.1007/s11783-022-1596-6>.
- SINGH, N.; OGUNSEITAN, O. A.; WONG, M. H.; TANG, Y. Sustainable Materials Alternative to Petrochemical Plastics Pollution: A Review Analysis. **Sustain. Horizons**, v. 2, p.100016, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2022.100016>.
- STOICA, M.; BICHESCU, C. I.; CREȚU, C.-M.; DRAGOMIR, M.; IVAN, A. S.; PODARU, G. M.; STOICA, D.; STUPARU-CREȚU, M. Review of Bio-Based Biodegradable Polymers: Smart Solutions for Sustainable Food Packaging. **Foods**, v.13, n. 19, 3027, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13193027>.
- STOICA, M.; MARIAN ANTOHI, V.; LAURA ZLATI, M.; STOICA, D. The Financial Impact of Replacing Plastic Packaging by Biodegradable Biopolymers - A Smart Solution for the Food Industry. **J. Clean. Prod.**, v. 277, p. 124013, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124013>.
- SUN, C.; WEI, Z.; XUE, C.; YANG, L. Development, Application and Future Trends of Starch-Based Delivery Systems for Nutraceuticals: A Review. **Carbohydr. Polym.**, 308, 120675, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120675>.
- SURENDRHIRAN, D.; ROY, V. C.; HO, T. C.; PARK, J.-S.; LEE, S.-C.; CHUN, B.-S. Smart Packaging Film Prepared from Subcritical Water-Modified Oat Starch and Betalain of Beetroot Extract Reinforced with Cellulose Nanofibrils. **Sustain. Chem. Pharm.**, v. 36, p.101349, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101349>.
- USDA National Nutrient Database. FoodData Central <https://fdc.nal.usda.gov/>.
- VISCO, A.; SCOLARO, C.; FACCHIN, M.; BRAHIMI, S.; BELHAMDI, H.; GATTO, V.; BEGHETTO, V. Agri-Food Wastes for Bioplastics: European Prospective on Possible Applications in Their Second Life for a Circular Economy. **Polymers (Basel)**, v. 14, n. 13, p. 2752, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14132752>.
- WANG, L.; LI, Y.; YE, L.; ZHI, C.; ZHANG, T.; MIAO, M. Development of Starch-Cellulose Composite Films with Antimicrobial Potential. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 276, p.133836, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133836>.
- WANG, N.; WARKENTIN, T. D.; VANDENBERG, B.; BING, D. J. Physicochemical Properties of Starches from Various Pea and Lentil Varieties, and Characteristics of Their Noodles Prepared by High Temperature Extrusion. **Food Res. Int.**, v. 55, p.119-127, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.043>.
- WANG, T.; ZHAO, Y. Optimization of Bleaching Process for Cellulose Extraction from Apple and Kale Pomace and Evaluation of Their Potentials as Film Forming Materials. **Carbohydr. Polym.**, v. 253, p. 117225, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117225>.
- ZINGE, C.; KANDASUBRAMANIAN, B. Nanocellulose Based Biodegradable Polymers. **Eur. Polym. J.**, v. 133, p.109758, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109758>.

