



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Utilização de resíduos agroindustriais para produção de polímeros, materiais e embalagens

Autor: Natália de Sá

Orientador: Profa. Dra. Jordana Corralo Spada

Porto Alegre, dezembro de 2021

Autor: Natália de Sá

Utilização de resíduos agroindustriais para produção de polímeros, materiais e embalagens

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientador: Profa. Dra. Jordana Corralo Spada

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Debora Jung Luvizetto Faccin, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Dra. Paula Bettio Staudt, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Estácio e Jaqueline, por todo o amor, carinho e suporte ao longo de todos os anos. Pela confiança, por nunca medirem esforços para me fazer feliz e sempre priorizarem a educação como um pilar fundamental no meu desenvolvimento. À minha família, especialmente aos meus irmãos Lucas e Isadora, a vida não seria a mesma sem vocês. Que sigamos sempre nos apoiando e torcendo um pelo outro. E ao Felipe e à Ana, por todos os momentos divididos, por também serem família e por torcerem e acreditarem em mim.

À minha professora e orientadora Jordana, por toda a paciência ao longo desse trabalho. Sempre tive uma admiração enorme por ela ao longo da graduação e não poderia ter escolhido melhor orientadora para fechar essa etapa. Muito obrigada, de coração!

Aos meus amigos e colegas de curso, que sabem muito bem a quão longa e difícil é essa jornada. Além de todo conhecimento técnico adquirido ao longo da graduação, as lembranças de todos que estiveram junto, seja nos momentos difíceis, ou de descontração, estarão sempre comigo. Ter tido uma enorme rede de apoio foi fundamental para que eu conseguisse chegar até aqui. E a tantos outros amigos que Porto Alegre me trouxe nesses últimos anos. Fiz dessa cidade minha casa graças a todos aqueles que foram lar de uma forma ou de outra.

À UFRGS e a todos os professores que contribuíram com a minha formação. Foi um privilégio ter a oportunidade de estudar em uma universidade com tamanho prestígio. A Universidade me preparou não somente profissionalmente, mas também me trouxe responsabilidade social. Espero conseguir contribuir com uma sociedade mais justa e com mais oportunidades.

Por fim, a todos aqueles que direta ou indiretamente participaram do meu caminho até aqui. Àqueles que incentivaram e torceram em diversos momentos. Encerro uma etapa para dar início a tantas novas e agradeço por ter tido muita gente querida ao meu redor.

RESUMO

A grande quantidade de resíduos gerada pelo descarte incorreto de embalagens plásticas advindas do petróleo é uma questão que desperta preocupação e tem estimulado a pesquisa de novos materiais de fonte renovável para a produção de embalagens biodegradáveis. Associado a isto, o desperdício de alimentos combinado com o elevado custo de tratamento desses resíduos tem servido como fator preponderante para que novas alternativas sobre a disposição final dos resíduos seja realizada. O objetivo deste trabalho foi elencar e explorar pesquisas relacionados ao uso de resíduos agroindustriais em áreas relacionadas à temática de embalagens como: formulação de compósitos e filmes; produção de biopolímeros, e desenvolvimento de embalagens ativas e/ou inteligentes. Durante a busca bibliográfica, foram encontrados diversos estudos, mas somente alguns foram apresentados devido à relevância e distinção. Após escolha dos trabalhos, eles foram analisados qualitativamente e divididos em três principais segmentos: produção e obtenção de biopolímeros; produção de compósitos e filmes, e desenvolvimento de embalagens ativa e inteligentes. Verificou-se que alguns resíduos possuem diversas aplicabilidades, podendo ser utilizados tanto como substrato para a produção de biopolímeros ou diretamente na formulação de compósitos. O maior destaque dos resíduos foi para a produção de polímeros e monômeros resultantes de rotas fermentativas como os polidroxialcanoatos e o ácido polilático, respectivamente. Na formulação de compósitos e blendas poliméricas para confecção de filmes, a maioria dos estudos relataram resultados positivos quanto à melhoria das propriedades dos materiais ao adicionar resíduos. Cabe ressaltar que, em alguns estudos, ao misturar diferentes subprodutos, melhores resultados foram encontrados em relação ao material com apenas um tipo de resíduo. No estudo de embalagens ativas, os principais ativos utilizados são extratos ricos em compostos fenólicos que atuam principalmente como antioxidantes e antimicrobianos, já nas embalagens inteligentes, as antocianinas, que são corantes naturais, são muito utilizadas como indicadoras de frescor. Grande parte desses extratos são obtidos de cascas e bagaços de frutas, sendo que muitos autores destacaram a necessidade de novos estudos relacionados ao aprimoramento de tecnologias que melhorem o rendimento dos extratos obtidos para aumentar a viabilidade econômica e produção em larga escala. Apesar do uso de resíduos ser promissor a nível acadêmico, poucas empresas relatam o uso de resíduos nas suas rotas de produção. Esse fato pode estar associado à dificuldade em manter um padrão de qualidade nos resíduos coletados, assim como questões de logística e transporte. Além disso, ainda carecem estudos que demonstrem os impactos sociais, econômicos e ambientais do uso destes subprodutos como matéria-prima nas áreas de aplicação citadas anteriormente.

Palavras-chave: *resíduos agroindustriais, biopolímeros, compósitos, embalagens ativas, embalagens inteligentes*

ABSTRACT

The large amount of waste generated by the incorrect disposal of plastic packaging resulting from oil is a matter of concern and has stimulated research into new materials from renewable sources for the production of biodegradable packaging. Correlated with this, the waste of food combined with the high cost of waste treatment, has served as a major factor for new alternatives on the final disposal of waste. The objective of this work was to list and explore researches related to the use of agro-industrial residues in areas related to the theme of packaging, such as: compacts and films; production of biopolymers, and development of active and/or intelligent packaging. During the bibliographical search, several studies were found, but only a few were presented due to their relevance. After choosing the works, they were qualitatively and divided into three main segments: production and obtaining of biopolymers; production of composites and films, and development of active and intelligent packaging. It was found that some residues have different applicability, and can be used either as a substrate for the production of biopolymers or directly on the basis of composites. The biggest highlight of the residues was for the production of polymers and monomers from fermentation routes such as polyhydroxyalkanoates and polylactic acid, respectively. In the information of polymer composites and blends for making films, most studies reported positive results regarding the improvement of material properties when adding residues. It is notable that, in some studies, when mixing different by-products, better results were found in relation to material with only one type of waste. In the study of active packaging, the main actives used are extracts rich in phenolic compounds that act mainly as antioxidants and antimicrobials, while in intelligent packaging, anthocyanins, which are natural dyes, are widely used as freshness indicators. A large part of these extracts are obtained from fruit peels and marcs, and many authors have highlighted the need for new studies related to the improvement of technologies that improve the yield of the extracts obtained to increase economic viability and large-scale production. Despite the use of residues being promising at the academic level, few companies report the use of residues in their production routes. This fact may be associated with the difficulty in maintaining a quality standard in the collected waste, as well as issues of logistics and transport. In addition, studies that demonstrate the social, economic and environmental impacts of the use of these by-products as raw material are still lacking.

Keywords: *Agro-industrial waste, biopolymers, composites, active packaging, intelligent packaging*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos plásticos quanto a sua biodegradação e fonte da matéria-prima. .	7
Figura 2. Capacidade global de produção de bioplásticos por segmento de mercado em 2020. As cores indicam o tipo de biopolímero utilizado em cada segmento.	8
Figura 3. Percentual de aumento de publicações entre 2015 e 2021 com os termos de busca: “Food waste, packaging”, “Byproducts, packaging”, “Active packaging”, Biopolymers, packaging”, Biopolymers, waste”, “Intelligent Packaging”.	12
Figura 4. Percentual de aumento de publicações em comparação com o ano de 2015 com o termo de busca “Active packaging” no site de busca Science Direct.	23
Figura 5. Percentual de aumento de publicações em comparação com o ano de 2015 com o termo de busca “Intelligent packaging” no site de busca Science Direct.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Número de publicações entre 2015 e 2021 correspondentes a diferentes termos de busca em bases de dados distintas.	10
Tabela 2. Publicações relacionadas à produção de biopolímeros a partir de resíduos.	13
Tabela 3. Resíduos agroindustriais usados na produção de compósitos ou filmes poliméricos.	19
Tabela 4. Publicações envolvendo o estudo de produção de embalagens ativas e inteligentes a partir de resíduos.	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ONU – Organização das Nações Unidas

PA – Poliamida

PBAT – Polibutirato

PBS – Polibutileno Succinato

PCL – Policaprolactona

PE – Polietileno

PET – Polietileno Tereftalato

PHA – Polihidroxialcanoatos

PHB – Polihidroxibutirato

PHB-HV – Poli(hidroxibutirato-co-valerato)

PLA – Poli ácidoláctico

WWF – World Wide Fund for Nature
ABIEF – Associação Brasileira de Embalagens Plásticas Flexíveis

Sumário

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
Sumário	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Geração de resíduos agroindustriais	2
2.2 Impacto ambiental associado ao uso de embalagens	4
2.3 Biopolímeros	6
3 Materiais e Métodos	10
4 Resultados	11
4.1 Obtenção de biopolímeros	12
4.2 Produção de compósitos e filmes	18
4.3 Desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes	22
5 Conclusão	30
6 Referências	32

1 Introdução

Materiais derivados da indústria petroquímica serviram de base durante anos para a produção de bens de consumo da sociedade, entretanto, com a crescente preocupação dos impactos associados ao meio ambiente, bem como com a escassez dos recursos de origem fóssil, estudos vêm sendo desempenhados a fim de buscar alternativas ao plástico advindo do petróleo. Nesse contexto, cresceram pesquisas relacionadas à produção de polímeros de origem renovável como aqueles provindos de rotas fermentativas como os polihidroxialcanoatos e o ácido polilático, assim como o desenvolvimento e caracterização de embalagens à base de polímeros como amido, quitosana, celulose bacteriana, entre outros. A fim de tornar economicamente mais viável o processo de produção ou o material a ser desenvolvido, diversos estudos têm focado no uso de resíduos agroindustriais. A incorporação de subprodutos advindos de diferentes fontes, não só auxilia nos custos, como também torna o processo mais sustentável, visto que muitos destes resíduos seriam destinados para compostagem ou aterros, ou utilizados para produção de ração animal. A obtenção de materiais biodegradáveis de origem renovável, viáveis economicamente e com propriedades similares aos polímeros/materiais convencionais corresponde ao objetivo dos diversos estudos desenvolvidos ou em desenvolvimento.

Diante deste cenário, foram selecionadas diversas pesquisas relacionadas às principais formas de utilização de resíduos agroindustriais na área de embalagens. Objetiva-se destacar quais são os resíduos que estão sendo estudados e quais os principais resultados obtidos. Por fim, o presente trabalho tem como meta verificar a possibilidade de agregar valor a diferentes resíduos na área de aplicação supracitada a nível de mercado.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção serão abordados tópicos relacionados à motivação do presente trabalho como a geração de resíduos agroindustriais e o impacto ambiental associado ao uso de embalagens plásticas. Além disso, serão fornecidas informações relevantes sobre biopolímeros, situando o leitor quanto a sua classificação, propriedades e importância.

2.1 Geração de resíduos agroindustriais

Práticas de consumo acelerado influenciam fortemente a geração de resíduos e, conseqüentemente, seus impactos na sociedade. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), no âmbito mundial, entre um quarto a um terço dos alimentos produzidos anualmente para o consumo humano se perde ou é desperdiçado ao longo da cadeia de produção e distribuição. Isso equivale a cerca de 1,3 bilhão de toneladas de alimentos que se perdem em todas as fases da cadeia alimentar (FAO, 2011).

As perdas no início da cadeia de alimentos são mais comuns em países subdesenvolvidos, que lidam com baixo aporte tecnológico no manejo das lavouras, carência de estrutura para estocagem da produção e infraestrutura inadequada para escoamento das safras. Já em países de média e alta renda, a maior contribuição para o desperdício parte do consumidor. Porém, mesmo no contexto da classe média baixa, o desperdício pode ocorrer por fatores culturais, como o gosto pela abundância à mesa, compras excessivas, armazenamento inadequado do alimento ou mesmo desinteresse pelo consumo das sobras. O Brasil, embora ainda enfrente perdas elevadas na fase pós-colheita, também apresenta elevado desperdício no final da cadeia. As evidências mostram o Brasil como um país que alia características de países em desenvolvimento, no que diz respeito às perdas dentro das propriedades rurais e no escoamento da produção, com hábitos de consumo de países ricos, caracterizados pelo elevado descarte de alimentos no final da cadeia (EMBRAPA, 2019).

De acordo com o Instituto Akatu, organização não-governamental sem fins lucrativos que trabalha pela conscientização e mobilização da sociedade para o consumo

consciente, o Brasil é o 4º maior produtor mundial de alimentos e também um dos campeões em desperdício. Cerca de 26 milhões de toneladas de alimentos vão para o lixo por ano; essa quantidade é suficiente para alimentar cerca de 19 milhões de pessoas com três refeições ao dia (café da manhã, almoço e janta) (AKATU, 2019).

No contexto nacional, o desafio para diminuir as perdas e desperdícios ao longo da cadeia exige mudanças tecnológicas na produção, armazenamento, processamento, distribuição, acesso e consumo de alimentos, bem como mudanças nos hábitos dos consumidores. Uma alternativa para aumentar a oferta de alimentos, sem aumentar necessariamente a área de produção agrícola, é a implementação de ações que visem à redução das perdas e desperdícios que ocorrem nas diferentes etapas da produção, começando com as práticas de pré e pós-colheita, passando pelo processamento, embalagem, comercialização até o consumo. Colheita apropriada, embalagem correta, uso da cadeia de frio, manuseio, transporte e logística de distribuição adequados, estradas bem pavimentadas, armazenamento correto, legislação apropriada e mudança de hábito dos consumidores são alguns dos itens necessários para a redução de perdas e desperdícios de alimentos (EMBRAPA, 2019). Enquanto essas práticas ainda carecem de desenvolvimento, torna-se indispensável a implementação de tecnologias que visem um melhor destino aos resíduos gerados. Atualmente, muitos resíduos estão retornando para a cadeia de alimentos ou indústria farmacêutica na forma de ingredientes; a partir dos resíduos das frutas, por exemplo, podem ser obtidos extratos ricos em compostos antioxidantes como os carotenoides e antocianinas, ou farinhas ricas em fibras e compostos nutracêuticos (CONTRERAS-CALDERÓN et al 2011; LIMA et al., 2014). Esses subprodutos são, geralmente, parcialmente aproveitados na fabricação de ração animal, sendo que a maior parte é descartada ou enviada para a compostagem. Outro setor que vem ganhando destaque quanto ao reaproveitamento de resíduos, corresponde ao de embalagens. De acordo com as metas da União Europeia, até 2050 a próxima geração de embalagens de alimentos deve contribuir significativamente para reduzir o desperdício em alimentos e materiais de embalagem e seus impactos negativos sobre o meio ambiente (GUILLARD et al., 2018).

Os resíduos agroindustriais podem ser aplicados em diferentes tipos de embalagens, e por serem produzidos em larga escala, cada vez mais vê-se um potencial para incorporá-

los como matérias-primas em embalagens biodegradáveis. Como exemplos típicos desses resíduos agroindustriais, pode-se citar bagaços de frutas, sementes, cascas de vegetais, biomassa da colheita e até frutas e vegetais inteiros de baixa qualidade. Alguns desses resíduos já são utilizados como matéria-prima para bioprocessamento de valor agregado, mas muitos são simplesmente jogados em aterros (ZHANG E SABLANI, 2021). De acordo com Regulamento Europeu (442/1975/EEC;689/ 1991/EEC), resíduo alimentar corresponde a resíduos de carga orgânica elevada, os quais são geralmente obtidos durante transformação de matérias-primas em produtos alimentares resultando em forma líquida ou sólida, enquanto subprodutos corresponde a uma designação que permite transmitir que “os resíduos alimentares” constituem substratos para a recaptura de compostos funcionais com viabilidade no desenvolvimento de novos produtos com valor de mercado (PINTADO E TEIXEIRA, 2015). Dessa forma, muitos componentes presentes em tais resíduos e subprodutos alimentares, por exemplo, polissacarídeos, proteínas, óleos essenciais, ácidos orgânicos ou lipídios podem ser usados como base polimérica ou como aditivos secundários que resultam em melhor desempenho ou diferentes funcionalidades em embalagens (ZHANG E SABLANI, 2021).

De acordo com uma nova pesquisa da ONU (2019), a população mundial chegará a 9,7 bilhões de habitantes até 2050. Tendo isso em vista, se os hábitos de consumo atuais forem mantidos, com números aproximados de 931 milhões de toneladas de alimentos desperdiçados no mundo todos os anos (FOOD WASTE INDEX REPORT, 2021), não há dúvidas de que a busca pela redução e reaproveitamento desses resíduos é de suma importância.

2.2 Impacto ambiental associado ao uso de embalagens

O Brasil, segundo dados do Banco Mundial, é o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia. Desse total, mais de 10,3 milhões de toneladas foram coletadas (91 %), mas apenas 145 mil toneladas (1,28 %) são efetivamente recicladas, ou seja, reprocessadas na cadeia de produção como produto secundário. Esse é um dos menores

índices da pesquisa e bem abaixo da média global de reciclagem plástica, que é de 9 %. Cabe ressaltar que, além das dificuldades encontradas na coleta dos materiais, há perdas no processo de separação dos tipos de plásticos nas usinas de reciclagem, seja pela contaminação do material, por apresentarem multicamadas ou por serem considerados de baixo valor de mercado. No final, o destino de 7,7 milhões de toneladas de plástico são os aterros sanitários; outros 2,4 milhões de toneladas são descartados de forma irregular, sem qualquer tipo de tratamento, em lixões a céu aberto (WWF, 2019).

A indústria da embalagem é a maior transformadora de plástico virgem em produtos; somente em 2015 foi responsável por converter quase 40 % de todo o plástico produzido (HAMILTON et al., 2019). Atualmente, os plásticos são os materiais mais utilizados para fins de embalagem, devido a várias vantagens como baixo custo, peso leve, alta versatilidade, flexibilidade, transparência, selagem a quente, desempenho mecânico e boas propriedades de barreira (LICCIARDELLO, 2017).

Entre as embalagens plásticas produzidas, estão as embalagens plásticas flexíveis. Segundo um estudo realizado pela Maxiquim, para a ABIEF – Associação Brasileira de Embalagens Plásticas Flexíveis, em 2020 a indústria brasileira de embalagens plásticas flexíveis registrou alta de 5,4 % no volume produzido em comparação ao ano anterior; a indústria de alimentos é considerada o principal mercado, consumindo 826 mil toneladas das 2,088 milhões de toneladas de embalagens flexíveis produzidas naquele ano.

Tendo em vista os elevados números de embalagens plásticas que são descartadas de maneira incorreta, a demanda por embalagens mais sustentáveis está crescendo em todo o mundo (GUILLARD et al., 2018); muitas empresas começaram a optar por embalagens de “plástico verde” ou biodegradáveis obtidas a partir de biopolímeros. Em 2019, a capacidade de produção global de bioplásticos totalizou cerca de 2,11 milhões de toneladas, com mais de 53 % do volume destinado ao mercado de embalagens - o maior segmento de mercado dentro da indústria de bioplásticos (EUROPEAN BIOPLASTICS e.V., 2015). Apesar do crescimento do mercado de bioplásticos, muitas matérias ainda apresentam custo elevado ou carecem de melhorias, sendo que o maior desafio no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis está em justamente combinar polímeros

verdadeiramente biodegradáveis com propriedades tão boas quanto aquelas encontradas nos de origem fóssil (CHANDRA E RUSTGI, 1998).

2.3 Biopolímeros

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM D5488-94de1), materiais biodegradáveis são aqueles capazes de sofrer decomposição em dióxido de carbono, metano, água, compostos inorgânicos, ou biomassa, em que o mecanismo predominante é a ação enzimática de microrganismos que podem ser medidos por testes padrão, ao longo de um período específico de tempo.

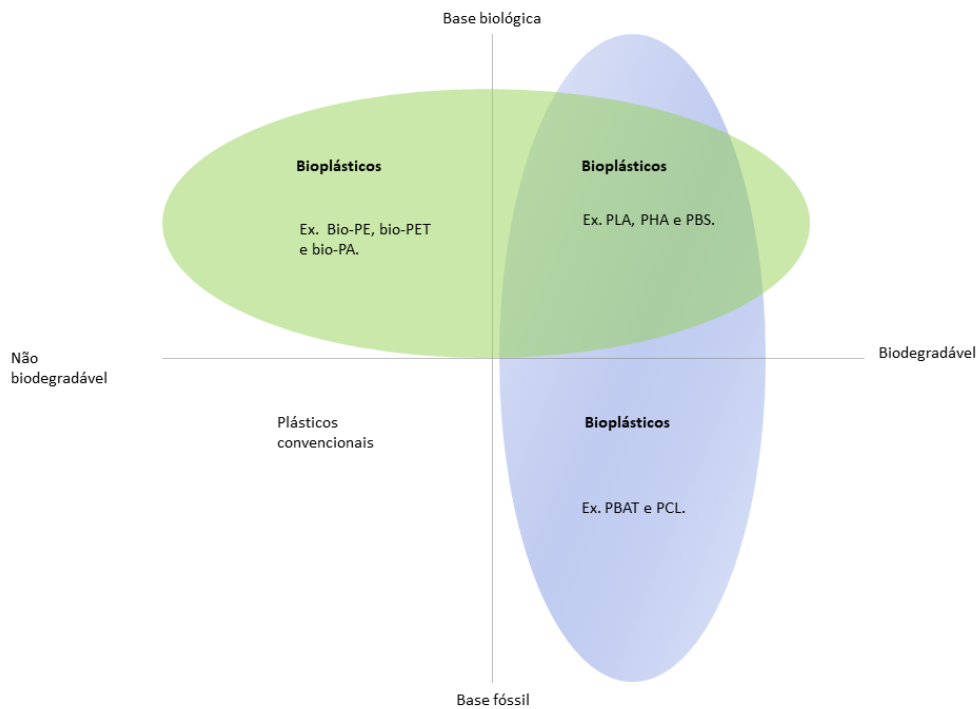
No estudo de biopolímeros, muitas vezes o termo “bio” é usado de forma equivocada; a diferença está na origem da matéria-prima e sua biodegradabilidade. Assim, nem todos os biopolímeros são biodegradáveis. Conforme Gómez e Michel (2013), os principais grupos de biopolímeros são:

- 1) Materiais de base biológica, não biodegradáveis, como bio-PE (polietileno), bio-PET (Polietileno Tereftalato) e bio-PA (poliamida). Esta classe representa aqueles polímeros considerados como “verdes”, onde apenas a fonte da matéria-prima é de origem renovável, mas o material continua sendo não-biodegradável, apresentando as mesmas características que os polímeros de origem fóssil;
- 2) Materiais de base biológica e biodegradáveis, como poli(ácido láctico) (PLA), poli(hidroxicanoatos) (PHA) e poli(butirenosuccinato) (PBS);
- 3) Materiais de fonte fóssil e biodegradáveis, como poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) e policaprolactona (PCL).

Os polímeros biodegradáveis de base biológica podem ser provenientes de fontes vegetais renováveis como milho, celulose, batata, cana de açúcar; podem ser sintetizados por bactérias a partir de moléculas como o ácido butírico e o ácido valérico para obtenção do poli(hidroxi-butilato) e poli(hidroxi-butilato-co-valerato), respectivamente, conhecidos

como PHB e PHB-HV; ou serem derivados de origem animal como a quitina e a quitosana (BRITO et al., 2011). A Figura 1 mostra a classificação dos polímeros quanto a sua origem e biodegradação, conforme demonstrado em documento da *European Bioplastics* (2020).

Figura 1. Classificação dos plásticos quanto a sua biodegradação e fonte da matéria prima.



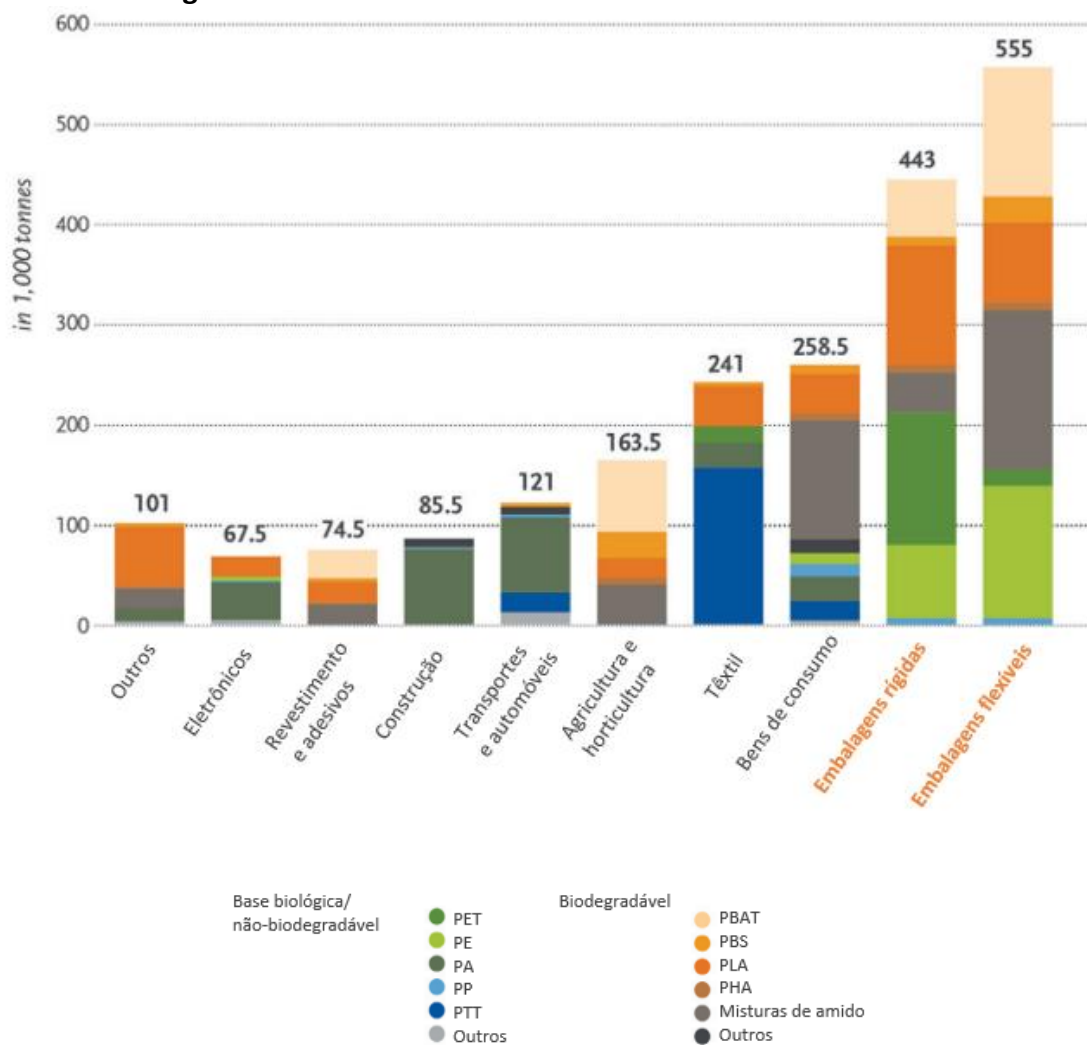
Fonte: Adaptado de European Bioplastics (2020)

Existe uma grande variedade de aplicações dos bioplásticos devido as suas propriedades e versatilidade. Na Figura 2 seguem as principais áreas de aplicações desses materiais, com destaque de 47 % (0,99 milhões de toneladas) para fins de embalagens. Além disso, nota-se que o bioplástico mais utilizado para produção de embalagens (rígidas e flexíveis) corresponde ao PLA, e devido a sua não-toxicidade, é o polímero mais escolhido para produção de embalagens para a indústria alimentícia (SIN et al., 2019; GUPTA et al., 2017). Ele apresenta elevado potencial para substituir uma ampla variedade de polímeros convencionais derivados de petróleo, contemplando diversas áreas do mercado de consumo, como produção de fraldas biodegradáveis, recipientes e lonas para agricultura, papéis de parede, equipamentos eletrônicos, entre outros (NATUREWORKS, 2021). A maior produtora e distribuidora mundial de PLA é a empresa NatureWorks,

pertencente a Cargill. A resina de PLA é vendida sob o nome comercial Ingeo™ e possui diferentes composições que se ajustam às diferentes aplicações industriais (SIN et al, 2019).

Entretanto, a desvantagem é que o PLA é um plástico de produção encarecida e sua compostagem só ocorre em condições ideais. Outro problema é que as normas americanas e brasileiras permitem a mistura de PLA a outros tipos de plásticos não biodegradáveis, o que, apesar de melhorar suas qualidades em termos de uso, prejudica sua qualidade em termos ambientais, visto que dessa forma, o descarte incorreto impossibilita a compostagem do mesmo.

Figura 2. Capacidade global de produção de bioplásticos por segmento de mercado em 2020. As cores indicam o tipo de biopolímero utilizado em cada segmento.



Fonte: Adaptado de European Bioplastics (2020)

Apesar de muitas vantagens, os biopolímeros possuem algumas limitações técnicas que tornam difícil sua processabilidade e seu uso como produto final. Diante disso, existem muitos grupos de pesquisas voltadas à produção de misturas, compósitos e nano compósitos com o intuito de melhorar a processabilidade, resistência térmica, propriedades mecânicas e reológicas, permeabilidade a gases e taxa de degradação (BRITO et al., 2011). No entanto, essa busca por melhores propriedades leva a uma diversidade de materiais e blendas que dificultam a disposição final dos mesmos (NARANCIC et al., 2018). Além disso, a falta de informação sobre o descarte correto dos materiais biodegradáveis acaba diminuindo o impacto positivo da substituição dos polímeros convencionais. A maioria dos biopolímeros ditos como compostáveis, geralmente não são compostáveis na compostagem doméstica, ou seja, devem ser destinados à compostagem industrial. O PLA, por exemplo, por si só não é compostável em casa, pois a sua biodegradação é normalmente desencadeada em temperaturas acima de 50°C, a qual não é alcançada na compostagem doméstica; quando associado com PCL na proporção PLA-PCL (80/20), a degradação a partir da compostagem doméstica é alcançada de maneira eficiente (NARANCIC et al., 2018). Contudo, cabe ressaltar que esses materiais não podem ser lançados no meio-ambiente de qualquer maneira, ou seja, o seu destino final não pode ser aterros, rios ou mares, visto que estes ambientes não permitem a biodegradação correta do material.

Portanto, pesquisas relacionadas ao aprimoramento das propriedades dos bioplásticos são importantes, mas também deve-se promover políticas públicas que visem o adequado gerenciamento e destino final desses materiais. Apesar dos plásticos biodegradáveis serem enviados predominantemente para compostagem, outras opções estão surgindo, como a degradação anaeróbia, que faz parte de uma estratégia de gestão integrada de resíduos que incluiria plásticos biodegradáveis usados para embalagens de alimentos (NARANCIC et al., 2018).

3 Materiais e Métodos

O presente trabalho trata-se de uma revisão de literatura integrativa, com abordagem qualitativa, que evidencia as possibilidades do reaproveitamento dos resíduos agroindustriais na área de embalagens. Os resultados da busca na literatura, realizada durante os meses de setembro e outubro de 2021, nas bases de dados conhecidas como SCIENCE DIRECT, SCIELO (Scientific Eletronic Library Online) e Google Scholar, utilizando as seguintes palavras-chave: *“Food waste, packaging”*; *“Byproducts, packaging”*; *“Active packaging”*; *“Biopolymers, packaging”*, *“Biopolymers, waste”* e *“Intelligent, packaging”*, encontram-se na Tabela 1. Com o intuito de facilitar o desenvolvimento do trabalho, houve a necessidade de limitar o período de publicações sobre o assunto entre 2015 e 2021.

Tabela 1. Número de publicações entre 2015 e 2021 correspondentes a diferentes termos de busca em bases de dados distintas.

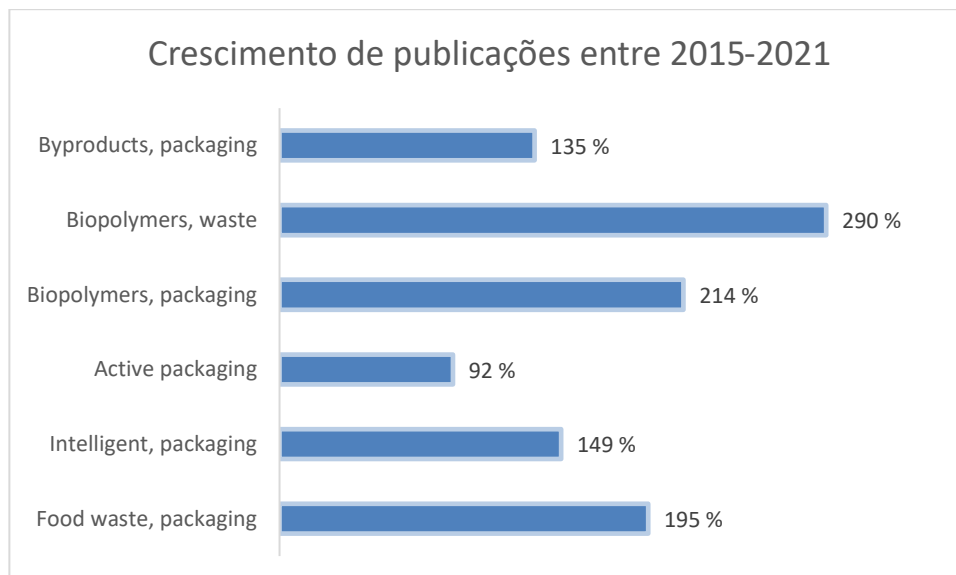
TERMOS DE BUSCA	BASE DE DADOS		
	GOOGLE SCHOLAR	SCIENCE DIRECT	SCIELO
Food waste, packaging	53.200	33.814	1
Byproducts, packaging	16.300	30.661	0
Active packaging	294.000	217.601	23
Biopolymers, packaging	19.800	12.315	0
Biopolymers, waste	21.400	15.099	0
Intelligent, packaging	36.100	19.910	4

4 Resultados

Após a etapa de busca nas bases de dados, encontraram-se 770.228 artigos científicos, sendo 329.400 no SCIENCE DIRECT, 440.800 no Google Scholar e 28 no SCIELO (Scientific Electronic Library Online) com os termos “*Food waste, packaging*”, “*Byproducts, packaging*”, “*Active packaging*”, “*Biopolymers, packaging*”, “*Biopolymers, waste*” e “*Intelligent packaging*”. Inicialmente, essa foi a busca realizada, no entanto, para atingir o objetivo do presente trabalho, notou-se que outras palavras deveriam ter sido usadas. Por exemplo, para melhor vincular o uso de resíduos com a obtenção de polímeros, foram utilizadas outras palavras-chaves como: “*Food waste, PLA*”, “*Food packaging, PLA*”, “*Biodegradable packaging, PLA*”, “*Biodegradable packaging, PHA*”, “*Waste residues, packaging, PHA*”, “*Waste residues, biopolymers*”, “*Food waste, biopolymers*”. Com esses termos de busca, foram encontrados os artigos mencionados na Tabela 2 apresentada no item 4.1. Cabe ressaltar que foram selecionadas as publicações mais recentes com base na relevância de cada estudo, destacando os tipos de resíduos utilizados, bem como os objetivos e principais resultados obtidos.

Na primeira etapa de busca e seleção de artigos, foi possível observar também que, com exceção de embalagens ativas “*Active packaging*”, todas as demais publicações com os termos de busca destacados anteriormente tiveram um crescimento de mais de 100 % entre os anos de 2015-2021, conforme apresentado na Figura 3. O aumento significativo de publicações dentro da temática de embalagens sustentáveis está atrelado aos comentários feitos ao longo da revisão bibliográfica, onde se destacou o desafio de produzir materiais economicamente viáveis com propriedades tão boas quanto os de origem fóssil e com baixo impacto ao meio ambiente.

Figura 3. Percentual de aumento de publicações entre 2015 e 2021 com os termos de busca: “Food waste, packaging”, “Byproducts, packaging”, “Active packaging”, “Biopolymers, packaging”, “Biopolymers, waste”, “Intelligent Packaging”.



Os tópicos a seguir tratarão das principais formas de utilização de resíduos para produção ou incorporação em embalagens sustentáveis, conforme a literatura abordada.

4.1 Obtenção de biopolímeros

Diferentes polímeros obtidos de origem agrícola estão disponíveis para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis. Polissacarídeos, proteínas e lipídios são matérias-primas usadas para preparar biopolímeros por meio de diferentes técnicas: eles podem ser extraídos e purificados para uso; podem ser usados como substratos de fermentação para produzir polímeros microbianos; e podem ser usados como substratos de fermentação na produção de monômeros ou oligômeros que serão polimerizados por processos químicos convencionais (GUILBERTE GONTARD, 2005). De acordo com a Sociedade Nacional de Agricultura (2012), os principais biopolímeros produzidos no Brasil são: polímero de amido (produzido com matérias-primas como o milho, a mandioca, a batata ou o trigo), polilactatos (produzido a partir do ácido láctico advindo de processos fermentativos por bactérias) e polihidroxialcanoatos (produzidos internamente por

bactérias que se alimentam de cana-de-açúcar, milho e óleo vegetal, por exemplo (FARIAS et al., 2016). Sendo o Brasil, líder mundial na produção de cana de açúcar e possuindo o menor custo de produção dessa matéria-prima, favorece, assim, a produção de polímeros como o PLA (BRITO et al., 2011).

Pesquisas relacionadas à obtenção de alguns biopolímeros a partir de diferentes resíduos estão apresentadas na Tabela 2. Nesta tabela foram elencados os artigos considerados relevantes, ou seja, com resultados satisfatórios em revistas de alto impacto. Nesses estudos, todos os autores destacam a necessidade de desenvolver novas soluções para mitigar os impactos relacionados ao desperdício de alimentos. Muitos resíduos agroindustriais como cascas de frutas cítricas, casca de banana, resíduos de polpas, melaço de cana de açúcar, casca de batata, casca de trigo e resíduos de azeite de oliva contêm uma grande quantidade de matéria orgânica como proteínas, amido, celulose, gordura, açúcar, pectina, entre outros, que possibilitam a produção de biopolímeros conforme será abordado na Tabela 2.

Tabela 2. Publicações relacionadas à produção de biopolímeros a partir de resíduos.

Resíduo	Biopolímero obtido ou extraído	Principais resultados/conclusão	Referências
Melaço da cana-de-açúcar e beterraba		Embora os custos de fabricação hoje ainda sejam muito altos para competir com os polímeros convencionais à base de petróleo, os avanços nos processos de fermentação submersos e de estado sólido usando fontes de carbono baratas tendem a torná-los mais competitivos economicamente.	Castilho et al. (2009)
Bagaço da cana hidrolisado	PHAs		
Soro de leite			
Resíduos do azeite de oliva			

Tabela 2 (continuação). Publicações relacionadas à produção de biopolímeros a partir de resíduos.

Resíduo	Biopolímero obtido ou extraído	Principais resultados/conclusão	Referências
Casca de banana verde	Amido	Maiores rendimentos de amido são obtidos pelo método de extração úmida com maiores concentrações de antioxidante (ácido ascórbico), enquanto o tempo de imersão não tem efeito significativo no rendimento. Resultados mostraram potencial comprovado para aproveitamento do resíduo e obtenção de produtos de valor agregado.	Hernández-Carmona et al. (2017)
Resíduos de café e algodão	PLA	Os autores estudaram a viabilidade econômica da produção de ácido polilático (PLA) em processos fermentativos com resíduos locais gerados de maneira expressiva. Resultados mostraram que os pellets de PLA são mais viáveis economicamente do que os plásticos sintéticos se os requisitos de qualidade forem atendidos.	Fahim et al. (2019)
Bagaço do limão	Pectina	A pectina obtida a partir do bagaço do limão com dióxido de titânio (TiO ₂) pode ser usada efetivamente como filmes comestíveis de qualidade alimentar e tem o potencial de substituição das embalagens de plástico sintético convencionais existentes.	Dash et al. (2019)

Tabela 2 (continuação). Publicações relacionadas à produção de biopolímeros a partir de resíduos.

Resíduo	Biopolímero obtido ou extraído	Principais resultados/conclusão	Referências
Palha de trigo Casca de arroz Resíduos de frutas como abacaxi, banana e suco de laranja	PHA	Resultados apresentaram excelente biodegradabilidade e biocompatibilidade, além disso a utilização de resíduos agrícolas propiciam a redução do custo de produção de PHA.	Wang et al. (2021)
Resíduos de caule de figo	Pectina	Resíduos de caule de figo seco ao sol são uma melhor fonte de pectina do que figos inteiros secos ao sol, uma vez que proporcionam maiores rendimento de extração, grau de esterificação, conteúdo de ácido galacturônico e homogeneidade. Quando comparadas com as propriedades da pectina cítrica comercial, apresentou excelente estabilidade de emulsão, capacidade de absorção de água e duas vezes mais atividade antioxidante, mas mais estudos são necessários para investigar os benefícios à saúde, como atividade prebiótica.	Çavdaroglu e Yemenicioğlu, (2021)
Mistura de arroz cozido, casca de batata, espiga de milho	PLA	O uso do FePO ₄ , juntamente com os resíduos agroindustriais na fermentação, levou a melhores propriedades térmicas do polímero em comparação com o PLA comercial.	Ahmad et al. (2021)

Tabela 2 (continuação). Publicações relacionadas à produção de biopolímeros a partir de resíduos.

Resíduo	Biopolímero obtido ou extraído	Principais resultados/conclusão	Referências
		O polímero produzido apresentou como resultados uma baixa cristalinidade, propriedades mecânicas atraentes, como elevada alongação antes da ruptura e boa resistência térmica.	Pereira et al. (2021)
Bagaço de maçã	PHA	A produção em larga escala de PHA com a utilização de bagaço de maçã, ainda apresenta muitas limitações, como o tempo improdutivo de resposta da reação, a qualidade incomum do produto e as possibilidades limitadas de fornecimento de certos componentes de carbono e, principalmente, a produção insuficiente.	Liu et al. (2021)
Resíduos do lagostim vermelho da Louisiana (Procambarus clarkii)	Quitosana	A quitosana obtida apresentou baixos valores de massa molar e viscosidade em comparação com a quitosana comercial. No entanto, apresentou excelência na cor, viscosidade e atividade antioxidante.	Omar et al. (2021)

Diante das informações apresentadas na Tabela 2, nota-se um crescente desenvolvimento de trabalhos que visam à redução de custos na produção de polihidroxialcanoatos com substratos advindos de resíduos. Vários resíduos como bagaço de fruta (LIU et al., 2021), palha de trigo e casca de arroz (WANG et al., 2021), melão de

cana e soro de leite (CASTILHO et al., 2009) foram considerados excelentes fontes renováveis para produção de PHAs. Além dos PHAs, a produção de PLA também vem sendo estudada através de rotas fermentativas economicamente mais viáveis. Resíduos de café e algodão advindos de uma produção local foram utilizados por Fahim et al. (2019) para produção do PLA e se mostraram promissores, visto que as propriedades do polímero produzido foram semelhantes aquelas dos polímeros sintéticos. Na mistura de arroz cozido, casca de batata e espiga de milho (AHMAD et al., 2021), a utilização de óxido metálico em dosagens adequadas comparando com a utilização de catalisadores convencionais, como o cloreto de estanho (SnCl_2) também aumentou o rendimento de ácido láctico, monômero precursor usado na produção de PLA.

Quanto à pectina, o principal processo industrial para sua obtenção está baseado na solubilização da protopectina do bagaço de maçã e casca de frutos cítricos, realizada em condições levemente ácidas sob aquecimento. No entanto, carece de estudos que utilizem outras fontes para extração e posterior caracterização do biopolímero obtido como material de embalagem. Dentre as citações encontradas, o bagaço de limão (DASH et al., 2019), com a incorporação de TiO_2 diminuiu significativamente a solubilidade em água. Isso se deve ao fato de que a incorporação de moléculas de TiO_2 na formulação do filme induziu a formação de ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila do amido e a rede $-\text{TiO}_2$, o que resultou em maior interação entre as cadeias moleculares. Isso levou à formação de uma estrutura mais forte e menos hidrofílica. Essa propriedade é extremamente importante quando trata-se de filmes para embalar alimentos com alto teor de umidade, ou armazenados em ambientes de alta umidade relativa.

A extração de polímeros como o amido para produção de filmes plásticos e espumas, a nível acadêmico e industrial, ainda é feita a partir de alimentos considerados aptos para o consumo, como milho, mandioca e batata. Presume-se que esta área carece de pesquisas devido às limitações do amido quando comparado a outros biopolímeros como o PLA e a família dos polihidroxicanoatos, que apresentam características e propriedades mais similares aos polímeros sintéticos obtidos da nafta.

Na grande maioria dos estudos, as limitações encontram-se principalmente na viabilidade de produção em larga escala. Como resíduos alimentares não possuem um

padrão de qualidade, o rendimento da reação encontra barreiras na extração e/ou fermentação dos compostos para produção de biopolímeros. Por isso, vê-se cada vez mais necessário o estudo de técnicas e processos não convencionais de extração que consigam viabilizar a produção em larga escala, uma vez que a utilização de resíduos já se mostrou eficiente tanto em termos de propriedades, quanto na redução do desperdício de alimentos.

No Brasil, empresas como a Terraw, com sede em Florianópolis, e a Green Living, com matriz no Rio de Janeiro, já comercializam embalagens plásticas de PLA advindo de substratos como o bagaço de cana-de-açúcar e palha de trigo, corroborando com o que tem sido abordado a nível acadêmico.

4.2 Produção de compósitos e filmes

Além da utilização do resíduo para a produção, obtenção ou extração do biopolímero, ele pode ser usado diretamente na formulação de filmes e estruturas mais rígidas que possam ser usadas como embalagens em diversos segmentos de mercado. Dentre os principais resíduos utilizados, destaca-se o uso daqueles ricos em fibras lignocelulósicas, sendo que diversos pesquisadores têm focado no desenvolvimento de materiais poliméricos reforçados com esse tipo de material (MATHUR, 2006). Quando os compósitos são derivados de matérias-primas vegetais, tanto na matriz como no reforço, eles se inserem na política de aproveitamento de recursos renováveis, visto que eles atendem aos requisitos de biodegradabilidade e preservação do meio ambiente durante todo o seu ciclo de vida (NETO et al., 2007). No entanto, muitos estudos têm abordado o uso de resíduos em matrizes poliméricas convencionais. Entre as técnicas de processamento mais comumente usadas para compósitos termoplásticos reforçados com fibras naturais, destacam-se moldagem por compressão, moldagem por injeção e extrusão (ARJMANDI et al., 2015).

A Tabela 3 mostra alguns artigos publicados nos últimos oito anos com ênfase na produção de compósitos e filmes poliméricos com resíduos agroindustriais na sua composição.

Tabela 3. Resíduos agroindustriais usados na produção de compósitos ou filmes poliméricos.

Resíduo	Objetivo	Referência
Sabugo de milho	Usar o resíduo como carga de enchimento em compósito com matriz de polipropileno.	Murcia e Sanchez (2013)
Fibra de casca de milho	Estudar o efeito da incorporação do resíduo assim como de outros componentes na microestrutura e nas propriedades físico-químicas e mecânicas de espumas e bandejas à base de amido de milho.	Polat et al. (2013)
Casca de ovo	Infundir nanopó de casca de ovo em resina epóxi de base biológica para possível aprimoramento de suas propriedades mecânicas.	Tiimob et al. (2015)
Casca de arroz	Destacar trabalhos anteriores de compósitos preenchidos com casca de arroz e fornecer informações para aplicações e futuras pesquisas nesta área.	Arjmandi et al. (2015)
	Desenvolver biocompósitos com amido como matriz e como enchimento a casca de arroz para melhorar as propriedades da espuma.	Spada et al. (2020)
	Avaliar o efeito da substituição do amido de milho pela proteína isolada do soro do leite em blendas poliméricas biodegradáveis desenvolvidas por extrusão.	Azevedo et al. (2017)
Soro de leite	Desenvolver e avaliar as propriedades de filmes comestíveis à base de isolado de proteína de soro de leite incorporados com extratos antioxidantes naturais de louro (<i>Laurus nobilis</i> L.) ou sálvia (<i>Salvia officinalis</i>).	Akcan et al. (2017)

Tabela 3 (continuação). Resíduos agroindustriais usados na produção de compósitos ou filmes poliméricos.

Resíduo	Objetivo	Referência
Bagaço de cana-de-açúcar e fibra de casca de aspargo	Avaliar o efeito da adição de bagaço de cana-de-açúcar e fibra de casca de aspargos nas propriedades físicas e mecânicas de espumas à base de amido de oca (<i>Oxalis tuberosas</i> Molina).	Cruz-Tirado et al. (2017)
Casca de coco	Avaliar as propriedades de materiais compósitos com a adição de resíduo de coco moído com superfície modificada. Resina epóxi modificada com óleo de soja acrilado epoxidado foi usada como matriz polimérica.	Kocaman et al. (2017)
Bagaço de cana-de-açúcar como componente principal, palha de milho, bagaço de malte, ou bagaço de laranja	Mistura dos resíduos agroindustriais em bandejas à base de amido de mandioca para melhora das propriedades mecânicas e biodegradabilidade.	Ferreira et al. (2020)
Casca e bagaço da laranja	Desenvolver filmes à base de amido de mandioca com a incorporação do resíduo da produção do suco de laranja na forma de pó ou de extrato aquoso utilizando a técnica de casting.	Luchese et al. (2021)
Resíduos do processamento do amido de mandioca	Substituir o amido de mandioca pelo amido gelatinizado, resíduo gerado na etapa de peneiramento do processamento do amido, para produção de filmes plásticos.	Luchese et al. (2021)

Entre os resíduos citados na Tabela 3, destaca-se a utilização de casca de arroz, um subproduto gerado de maneira abundante durante o processamento do arroz branco polido. Um dos principais destinos para a casca de arroz é a sua disposição a céu aberto ou queima, o que gera graves problemas ambientais, como a poluição da água, do solo e do ar. Assim, há necessidade latente de aproveitamento desse resíduo. A adição de casca de arroz em uma base polimérica de amido melhorou as propriedades mecânicas e

reduziu a densidade e capacidade de absorção de água em comparação com compósitos feitos apenas com amido (SPADA et al., 2020). Outros pesquisadores como Johar e Ahmad (2012), Kargarzadeh et al. (2017) e Boonsuk et al. (2021) também publicaram estudos avaliando diferentes propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas de materiais biocompósitos desenvolvidos a partir de amido de mandioca utilizando casca de arroz como agente de reforço e encontraram resultados promissores.

Este resultado pode ser associado à presença de lignina que contém porções cristalinas resistentes à moléculas de água, sendo considerada muito mais hidrofóbica do que celulose e hemicelulose.

Além das citações levantadas, foram encontrados muitos estudos na literatura com a utilização de amido para produção de compósitos (SGANZERLA et al., 2020), (SUNARTI et al., 2015), (MACHADO et al., 2018) e (ENGEL et al., 2019). Esse polímero é amplamente estudado, pois além de sua elevada disponibilidade, apresenta baixo custo, é atóxico e compostável. Entretanto, devido ao seu caráter hidrofílico e por apresentar propriedades mecânicas sensíveis ao teor de umidade do ambiente, o amido puro apresenta limitações na sua aplicação como embalagem quando comparado aos polímeros à base de petroquímicos. Dessa forma, diversos resíduos agroindustriais de composição lignocelulósica estão emergindo como promissores aditivos às espumas à base de amido. A aplicação destes materiais, além de ajudar a minimizar problemas ambientais, pode gerar produtos com propriedades relevantes, uma vez que sua composição é majoritariamente composta de celulose, hemicelulose e lignina. Esses compostos são capazes de reforçar a matriz polimérica e entregar melhores propriedades mecânicas e físicas às espumas devido às fortes interações entre as fibras e o amido, além de aprimorar a biodegradabilidade das mesmas (ENGEL, 2018). Conforme elencado na Tabela 3, alguns resíduos apresentam melhores propriedades quando combinados, como o bagaço de cana-de-açúcar misturado com palha de milho, bagaço de malte e bagaço de laranja que levaram o compósito a uma maior capacidade de degradação e diminuição da higroscopicidade em relação aquele feito apenas com amido de mandioca (FERREIRA et al., 2020). Entre os testes realizados nesse estudo, quando se tratou de rigidez, a combinação de bagaço de cana-de-açúcar com palha de milho apresentou os melhores

resultados; a incorporação das cadeias poliméricas da matriz de amido e as fibras adicionadas interagiram em maior extensão, proporcionando bandejas mais rígidas. Por outro lado, em bandejas com alto teor de bagaço de malte ou bagaço de laranja (acima de 20 %), as fibras e a matriz do amido interagiram de forma mais fraca, o que diminui a rigidez, elasticidade e resistência à tração. Em relação ao teste de biodegradabilidade, as bandejas biodegradáveis que apresentaram os melhores resultados foram as bandejas reforçadas com bagaço de laranja. As bandejas biodegradáveis acrescidas de 20 ou 30 % desse resíduo agroindustrial são completamente degradadas após 60 dias. Esses resultados demonstram a importância de se estudar combinações de diferentes compostos em diferentes proporções. Ademais, é importante destacar que as propriedades desejadas dos compósitos variam conforme as características intrínsecas das fibras e a sua concentração, além da sua aplicação.

A nível de mercado, no Brasil, a empresa Bio&Green comercializa tubetes e potes para plantas confeccionados com bagaço de cana, sisal, carauá, juta e cascas de café e arroz. A proposta desta empresa, inicialmente, era trabalhar com embalagens biodegradáveis do tipo espuma para alimentos.

4.3 Desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes

Além do aumento de pesquisas sobre matérias-primas biodegradáveis que possibilitem substituir o plástico de origem fóssil na produção de filmes e embalagens, nos últimos anos cresceu o estudo em embalagens que trouxessem mais do que apenas o seu uso convencional. Essas novas embalagens são chamadas de embalagens ativas e inteligentes. De acordo com Vanderroost et al. (2014), as embalagens inteligentes possuem um componente que atribui a elas a capacidade de sentir, detectar ou registrar alterações no produto ou no ambiente em que estão contidas. Portanto, esse tipo de embalagem é uma extensão da função usual de comunicação da embalagem tradicional, fornecendo ao indivíduo informações confiáveis e corretas sobre as condições do alimento, do ambiente e ainda da integridade da embalagem.

Enquanto as embalagens ativas podem ser absorvedoras ou emissoras, permeáveis a gases e responderem à temperatura e apresentarem propriedades antimicrobianas, as embalagens inteligentes estão mais ligadas ao diagnóstico (com a presença de indicadores) e à comunicação (com sistemas de etiquetas) (WOOD, 2005). Em outras palavras, as embalagens ditas ativas interagem com o produto ou com o meio circundante, diferente das embalagens inteligentes que interagem com o consumidor. Nas Figuras 4 e 5 é possível observar o crescimento de publicações envolvendo os termos de busca *Active packaging* e *Intelligent packaging* nos últimos anos (em relação ao ano de 2015). O número de publicações entre os anos de 2015 e 2021 com os termos de busca “Active Packaging” e “Intelligent packaging” no site de busca Science Direct resultou em 218.672 e 19.872 artigos, respectivamente.

Figura 4. Percentual de aumento de publicações em comparação com o ano de 2015 com o termo de busca “*Active packaging*” no site de busca Science Direct.

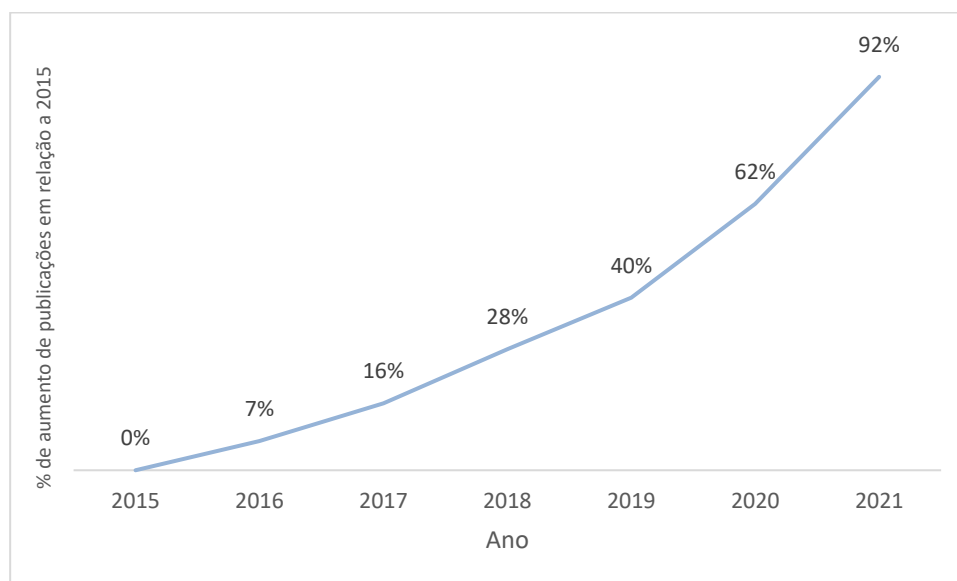
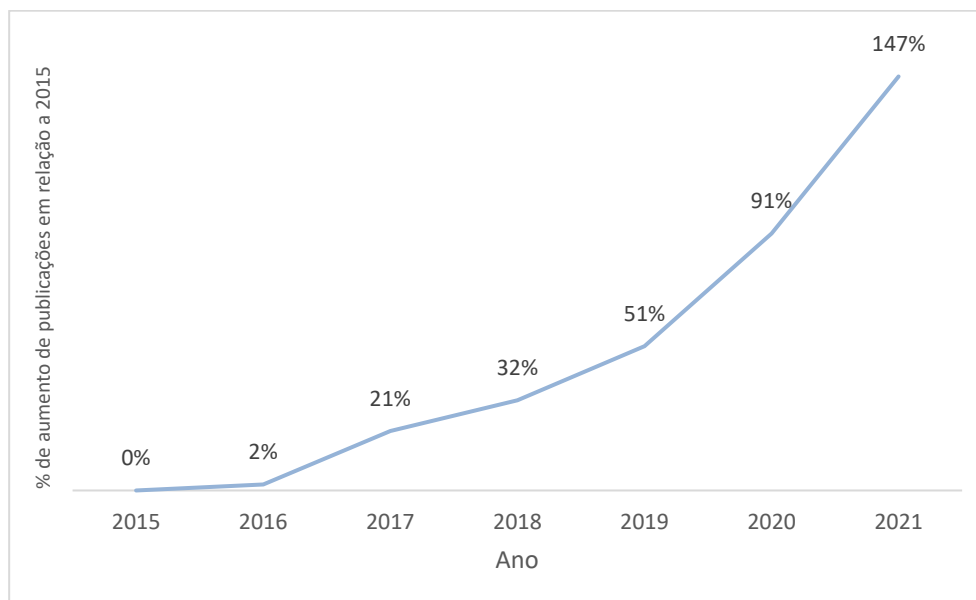


Figura 5. Percentual de aumento de publicações em comparação com o ano de 2015 com o termo de busca “*Intelligent packaging*” no site de busca Science Direct.



Os resultados de vários estudos de pesquisa estabeleceram o potencial de empregar com eficácia sistemas de embalagem ativos e inteligentes contendo extratos naturais de plantas para monitoramento de qualidade de vários produtos perecíveis (KUSWANDI et al., 2012). Entretanto, ainda há limitações para a produção de embalagens ativas e inteligentes em larga escala que possuam propriedades iguais ou melhores que as dos plásticos convencionais com valor competitivo no mercado. Portanto, o uso de matérias-primas vegetais e resíduos agroindustriais mostra-se cada vez mais importante para reduzir o desperdício e gerar maior viabilidade econômica. Além disso, diferentes combinações de resíduos podem ser estudadas para aumentar a segurança e garantir a eficácia dessas embalagens. A Tabela 4 traz um compilado de algumas publicações relacionadas ao desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes com compostos advindos de resíduos agroindustriais.

Tabela 4. Publicações envolvendo o estudo de produção de embalagens ativas e inteligentes a partir de resíduos.

Resíduo	Objetivo	Principais resultados	Referências
Resíduo agroindustrial de mirtilo (<i>Vaccinium corymbosum</i> L.)	Produção de filmes inteligentes à base de amido de mandioca por termocompressão com resíduo de mirtilo como indicador de mudança de pH	A inserção do resíduo levou à formação de filmes menos compactos com alta permeabilidade ao oxigênio. Além disso, eles exibiram alterações de cor visualmente perceptíveis na faixa de pH entre 2 e 12	Andretta et al., (2019)
	Produção de filmes inteligentes à base de amido de milho por <i>casting</i> com resíduo de mirtilo como indicador de mudança de pH	Os valores de variação total de cor foram maiores que 3, sugerindo uma mudança visualmente perceptível ao olho humano, sendo potencial indicador de pH para embalagens inteligentes	Luchese et al. (2017)

Tabela 4 (continuação). Publicações envolvendo o estudo de produção de embalagens ativas e inteligentes a partir de resíduos.

Resíduo	Objetivo	Principais resultados	Referências
Casca de feijão preto e repolho roxo	Desenvolver filmes sensíveis ao pH à base de amido de milho e antocianinas extraídas do tegumento do feijão preto e repolho roxo	Os filmes sensíveis ao pH com antocianinas de repolho roxo apresentaram maior estabilidade do que com antocianinas de feijão preto quando armazenados em temperatura ambiente. Ambos propriedades óticas e morfológicas sensíveis às mudanças no pH, sugerindo que o indicador foi potencialmente útil como indicador de qualidade	Prietto et al. (2017)
Extrato de agulha de pinho Cedrus deodara	Desenvolver novos materiais à base de proteína de soja com a incorporação de nanofibrila de celulose , extrato de agulha de pinho Cedrus deodara e ácido láctico	Os materiais apresentaram excelente capacidade antioxidante e antimicrobiana, além de elevada barreira à luz. Isso representa um grande potencial como embalagem ativa de alimentos	Yu et al. (2019)

Tabela 4 (continuação). Publicações envolvendo o estudo de produção de embalagens ativas e inteligentes a partir de resíduos.

Resíduo	Objetivo	Principais resultados	Referências
Extrato do bagaço de maçã derivado da produção de sidra	Melhorar as propriedades de filmes ativos <i>à base</i> de celulose bacteriana com revestimentos de PHA e diferentes quantidades de extratos de maçã	Os filmes com extrato apresentaram maior capacidade antioxidante, hidrofobicidade e transparência	Urbina et al. (2019)
Extrato de tegumento de soja preta contendo antocianinas	Desenvolver filmes à base de quitosana com capacidade antioxidante e sensível ao pH através da incorporação de diferentes quantidades de extrato de tegumento de soja preta	Os filmes à base de quitosana podem ser considerados materiais promissores e sensíveis ao pH para uso em embalagem de alimentos	X. Wang (2019)
Extrato de cascas de banana	Desenvolver filmes de quitosana com atividade antioxidante	Excelente atividade antioxidante e redução da hidrofobicidade	Zhang et al. (2019)
Pó de casca de uva	Desenvolver filmes partir de k-carragenina misturada com hidroxipropilmetilcelulose e adicionando diretamente pó de casca de uva rico em antocianinas	Excelente indicador de pH para indicar o frescor dos alimentos devido a sua sensibilidade ao indicador	Chi et al. (2020)

Tabela 4 (continuação). Publicações envolvendo o estudo de produção de embalagens ativas e inteligentes a partir de resíduos.

Resíduo	Objetivo	Principais resultados	Referências
Resíduo do subproduto de <i>Acca sellowiana</i> (farinha de casca de feijoa)	Produzir embalagens para armazenar maçã	A alta concentração de compostos antioxidantes nos filmes promoveu atividade antimicrobiana contra <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> e <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Sganzerla et al. (2020)
Biomassa residual do óleo de café verde prensado a frio	Incorporar o resíduo em filmes de carboximetilcelulose (CMC)	Filmes com boa capacidade antioxidante e boas propriedades de barreira ao oxigênio	Vidal et al. (2021)

A partir das pesquisas, identificou-se um enorme potencial de incorporação de resíduos, principalmente extratos de alimentos e farelos como matéria-prima em filmes e embalagens biodegradáveis, destacando melhoras nas propriedades físico-químicas, ópticas e de barreira. Os ativos presentes em diversos resíduos derivados de ácido fenólico, principalmente derivados de ácido hidroxicinâmico e flavonóides, apresentam propriedades antioxidantes e podem ser usados em diferentes campos, como cosméticos ou aplicações de embalagens ativas. A presença desses ativos em resíduos como bagaço de maçã (URBINA et al., 2019), extrato de agulha de pinho *Cedrus deodara* (YU et al., 2019), biomassa residual do óleo de café verde prensado a frio (VIDAL et al. 2021), extrato de cascas de banana (ZHANG et al. 2019), além dos fitoquímicos bioativos presente no subproduto de *Acca sellowiana* (farinha de casca de feijoa) (SGANZERLA et al., 2020), destacam-se principalmente pela capacidade antioxidante e servem como alternativa aos aditivos sintéticos conhecido como BHA (Butil-hidroxianisol) e BHT (Butil-hidroxitolueno). Contudo, além dessas embalagens ativas interagirem com o produto, elas podem protegê-lo fisicamente, prolongando a sua vida de prateleira.

Além dos resíduos utilizados para a produção de embalagens ativas, existem aqueles vinculados a extração de corantes naturais sensíveis às mudanças no alimento ou no meio circundante para confecção de embalagens inteligentes. Numerosos pigmentos e corantes sintéticos são usados no desenvolvimento desse tipo de embalagem, como clorofenol, cresol e vermelho de metila (DONG et al., 2008), verde de bromocresol (PACQUIT et al., 2007), azul de bromocresol (ANDREOU & CLONIS, 2002) e xilenol (SOLIMAN et al., 2016). Esses compostos podem ser potencialmente tóxicos e mutagênicos, podendo ser liberados para o material da embalagem e, portanto, inadequados para embalagens de alimentos (ZHAI et al., 2017). Portanto, pesquisas recentes enfocam o incorporação de pigmentos derivados naturalmente de produtos vegetais e resíduos de alimentos, que estão prontamente disponíveis, são atóxicos, econômicos, sensíveis, seguros e confiáveis (KUSWANDI et al., 2012). Os resíduos mais utilizados para extração de corantes e produção de embalagens inteligentes são aqueles ricos em compostos antociânicos como bagaço de mirtilo (*Vaccinium corymbosum* L.) (LUCHESE et al., 2017) e (ANDRETTA et al., 2019), bagaço de uva (CHI et al., 2020), repolho roxo (PRIETTO et al., 2017) e tegumento de soja preta (X. WANG 2019).

5 Conclusão

Neste trabalho, os resultados levantados a partir da literatura foram analisados qualitativamente e divididos em três principais segmentos para facilitar as discussões. Alguns resíduos possuem diversas aplicabilidades, podendo ser utilizados tanto como substrato para a produção de biopolímeros ou diretamente na formulação de compósitos, como o bagaço da cana-de-açúcar e a casca de arroz. Cabe ressaltar que em todos os estudos destacou-se a necessidade de mitigar os impactos relacionados ao desperdício e destino dos subprodutos gerados.

Inicialmente foram identificados os principais resíduos para produção e/ou obtenção de biopolímeros. A utilização de resíduos agroindustriais se destacou na produção de polihidroxialcanoatos e ácido polilático, visto que diversas fontes apresentam uma composição rica em polissacarídeos, proteínas e açúcares que possibilitam o crescimento dos microrganismos e a produção dos compostos de interesse. Quanto aos polímeros que foram extraídos de resíduos, destacam-se a pectina e a quitosana.

No produção de compósitos e filmes, a maior parte dos resíduos são incorporados para melhora das propriedades dos materiais. Notou-se que grande parte dos artigos relatam a inserção de bagaços e cascas em matrizes de amido para produção de estruturas semirrígidas. Resíduos como a casca de arroz, por sua vez, são amplamente utilizados em matrizes poliméricas, trazendo resultados de melhora nas propriedades mecânicas e redução nos valores de absorção de água, propriedades importantes para uso em embalagens de maneira geral.

Em relação ao desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes, os extratos obtidos a partir de resíduos agroindustriais atuam, geralmente, como antioxidantes e antimicrobianos em embalagens ativas. Já nas embalagens inteligentes, são muito utilizados os corantes naturais ricos em antocianinas devido à sua capacidade de mudança de coloração quando em contato com diferentes valores de pH.

Percebe-se que diferentes resíduos agroindustriais, inicialmente sem valor de mercado, poderiam ser utilizados para fins mais nobres, como a produção de embalagens mais sustentáveis. Contudo, para viabilidade de utilização do resíduo, deve-se levar em conta a oferta na região. A casca de arroz, por exemplo, que ainda carece de descarte correto apropriado é um dos resíduos mais abundantes gerados a partir do setor agroindustrial, sendo a maior parte originada no Rio Grande do Sul, região promissora no reaproveitamento desse resíduo e que possui diversos estudos relacionados ao seu reaproveitamento.

No entanto, a utilização de grande parte dos resíduos citados em escala comercial só será possível após padronização da qualidade dos mesmos e implementação de um sistema de logística e transporte adequados. Outro ponto importante está relacionado ao descarte correto desses novos materiais biodegradáveis, visto que nem sempre eles podem ser conduzidos à compostagem doméstica, tornando indispensável um sistema de separação e coleta adequados.

6 Referências

AHMAD, A.; OTHMAN, I.; RAMBABU, K.; et al. Polymerization of lactic acid produced from food waste by metal oxide-assisted dark fermentation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 101862, 2021.

AKCAN, T.; ESTÉVEZ, M.; SERDAROĞLU, M. Antioxidant protection of cooked meatballs during frozen storage by whey protein edible films with phytochemicals from *Laurus nobilis* L. and *Salvia officinalis*. **LWT - Food Science and Technology**, v. 77, p. 323–331, 2017.

ANDRETTA, R.; LUCHESE, C. L.; TESSARO, I. C.; et al. Development and characterization of pH-indicator films based on cassava starch and blueberry residue by thermocompression. **Food Hydrocolloids**, v. 93, n. November 2018, p. 317–324, 2019.

ARJMANDI, R.; HASSAN, A.; MAJEED, K.; et al. Rice Husk Filled Polymer Composites. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, p. 32, 2015.

AZEVEDO, V. M.; BORGES, S. V.; MARCONCINI, J. M.; et al. Effect of replacement of corn starch by whey protein isolate in biodegradable film blends obtained by extrusion. **Carbohydrate Polymers**, v. 157, p. 971–980, 2017.

BIOPLÁSTICO: CONHEÇA TIPOS E APLICAÇÕES, **Ecycle**, 2019. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/bioplastico/>>. Acesso em: 17 out. 2021.

BIOPLASTICS PACKAGING – COMBINING PERFORMANCE WITH SUSTAINABILITY. **EUROPEAN (The European Organization for Packaging and the Environment)**. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org/news/publications/>. Acesso em: 17 de out. de 2021.

BOONSUK, P.; SUKOLRAT, A.; BOURKAEW, S.; et al. Structure-properties relationships in alkaline treated rice husk reinforced thermoplastic cassava starch biocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 167, p. 130–140, 2021.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.6.2 , p. 127-139, 2011.

CASTILHO, L. et al. Production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from waste materials and by-products by submerged and solid-state fermentation. **Bioresource Technology**, v.100, p. 5996-6009, 2009.

ÇAVDAROĞLU, E.; YEMENICIOĞLU, A. Utilization of stalk waste separated during processing of sun-dried figs (*Ficus carica*) as a source of pectin: Extraction and determination of molecular and functional properties. **Lwt**, v. 154, p. 112624, 2021.

CHANDRA, R.; RUSTGI, R. Biodegradable polymers. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 23, n. 7, p. 1273–1335, 1998.

CHI, W.; CAO, L.; SUN, G.; et al. Developing a highly pH-sensitive κ -carrageenan-based intelligent film incorporating grape skin powder via a cleaner process. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118862, 2020.

CRUZ-TIRADO, J. P.; SICHE, R.; CABANILLAS, A.; et al. Properties of baked foams from oca (*Oxalis tuberosa*) starch reinforced with sugarcane bagasse and asparagus peel fiber. **Procedia Engineering**, v. 200, p. 178–185, 2017.

DASH, K. K.; ALI, N. A.; DAS, D.; et al. Thorough evaluation of sweet potato starch and lemon-waste pectin based-edible films with nano-titania inclusions for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 139, p. 449–458, 2019.

DAWEI, Yun. Development of active and intelligent films based on cassava starch and Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) anthocyanins. **RSC Advances**, v.53, p. 30615-31195, 2019.

ENGEL, J. B. **Propriedades de espumas à base de amido de mandioca com incorporação de engaço de uva**. TESE (Mestrado em Engenharia Química) - UFRGS. Porto Alegre, p. 160, 2018.

ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 225, n. August, p. 115234, 2019.

FAHIM et al. The synthesis, production & economic feasibility of manufacturing PLA from agricultural waste. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v.12, p. 100142, 2019.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/>>. Acesso em: 17 out. 2021

FARIAS, S. S.; SIQUEIRA, S. M. C.; CRISTINO, J. H. S.; et al. Biopolímeros: Uma alternativa para promoção do desenvolvimento sustentável. **Revista Geonorte**, v. 7, n. 26, p. 61–77, 2016.

- FERREIRA, D. C. M.; MOLINA, G.; PELISSARI, F. M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, n. July 2019, p. 107682, 2020.
- GUILLARD, V.; GAUCEL, S.; FORNACIARI, C.; et al. The Next Generation of Sustainable Food Packaging to Preserve Our Environment in a Circular Economy. **Frontiers Media S.A.**, 2018.
- HAMILTON, A.; SCHEER, R.; STAKES SIMON ALLAN, T. Solucionar a poluição plástica: Transparência e Responsabilização. **WWF**, 2019.
- HERNÁNDEZ, Carmona et al. Starch extraction potential from plantain peel wastes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.5, p. 4980-4985, 2017.
- JOHAR, N.; AHMAD, I. Morphological, thermal, and mechanical properties of starch biocomposite films reinforced by cellulose nanocrystals from rice husks. **BioResources**, v. 7, p. 5469–5477, 2012.
- KARGARZADEH, H.; JOHAR, N.; AHMAD, I. Starch biocomposite film reinforced by multiscale rice husk fiber. **Composites Science and Technology**, v. 151, p. 147–155, 2017.
- KOCAMAN, S.; KARAMAN, M.; GURSOY, M.; et al. Chemical and plasma surface modification of lignocellulose coconut waste for the preparation of advanced biobased composite materials. **Carbohydrate Polymers**, v. 159, p. 48–57, 2017.
- LICCIARDELLO, F. Packaging, blessing in disguise. Review on its diverse contribution to food sustainability. **Trends in Food Science and Technology**, v. 65, n. November, p. 32–39, 2017.
- LIU, H.; KUMAR, V.; JIA, L.; et al. Biopolymer poly-hydroxyalkanoates (PHA) production from apple industrial waste residues: A review. **Chemosphere**, v. 284, n. July, p. 131427, 2021.
- LUCHESE, C. L. et al. Effect of blueberry agro-industrial waste addition to corn starch-based films for the production of a pH-indicator film. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], v. 104, p. 11–18, 2017.
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. **Industrial Crops and Products**, v. 102, p. 115–121, 2017.
- MURCIA, J. C.; SANCHEZ, K. E. **DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO (PP) COM SABUGO DE MILHO (SM) PROVENIENTE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS**. TESE (Mestrado Engenharia de Materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, p. 76, 2013.
- NARANCIC, T.; VERSTICHEL, S.; REDDY CHAGANTI, S.; et al. Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a

Panacea for Plastic Pollution. **Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 18, p. 10441–10452, 2018.

OMAR, B.; ELMASRY, R.; EITA, A.; et al. Upgrading the preparation of high-quality chitosan from *Procambarus clarkii* wastes over the traditional isolation of Shrimp chitosan. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 2021.

PEREIRA, J. R.; ARAÚJO, D.; FREITAS, P.; et al. Production of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca*: Cultivation on fruit pulp waste and polymer characterization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 167, p. 85–92, 2021.

Perdas e desperdícios de alimentos. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)**, 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-perdas-e-desperdicio-de-alimentos/sobre-o-tema/>>. Acesso em: 17 de out. de 21.

PINTADO; TEIXEIRA. Valorização de subprodutos da indústria alimentar: obtenção de ingredientes de valor acrescentado. **Boletim de Biotecnologia**, p. 10–12, 2015.

POLAT, S.; USLU, M. K.; AYGÜN, A.; et al. The effects of the addition of corn husk fibre, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 2, p. 267–276, 2013.

PRIETTO, L.; MIRAPALHETE, T. C.; PINTO, V. Z.; et al. pH-sensitive films containing anthocyanins extracted from black bean seed coat and red cabbage. **LWT - Food Science and Technology**, v. 80, p. 492–500, 2017.

RELATÓRIO DE ATIVIDADES 2019, **AKATU**, 2019. Disponível em: <Akatu publica Relatório de Atividades 2019 - Instituto Akatu>. Acesso em: 17 out. 2021.

SGANZERLA, W. G.; ROSA, G. B.; FERREIRA, A. L. A.; et al. Bioactive food packaging based on starch, citric pectin and functionalized with *Acca sellowiana* waste by-product: Characterization and application in the postharvest conservation of apple. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 295–303, 2020.

SIN, L.T. e TUEEN, B.S., *Polylactic Acid: A Practical Guide for the Processing, Manufacturing, and Applications of PLA*, *Plastics Design Library, Polylactic Acid (Segunda Edição)*, **William Andrew Publishing**, 2019.

SPADA, J. C.; JASPER, A.; TESSARO, I. C. Biodegradable Cassava Starch Based Foams Using Rice Husk Waste as Macro Filler. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 8, p. 4315–4325, 2020.

SUNARTI, T.; INTEGRANI, H.; SYAMSU, K. Effect of Cocopeat Addition to Some Properties of Cassava Starch-Based Foam. **Macromolecular Symposia**, v. 353, 1 jul. 2015.

TIIMOB et al. Eggshell reinforced biocomposite—An advanced “green” alternative structural material. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 133, p. 43124, 2015.

URBINA, L.; ECEIZA, A.; GABILONDO, N.; et al. Valorization of apple waste for active packaging: multicomponent polyhydroxyalkanoate coated nanopapers with improved hydrophobicity and antioxidant capacity. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 21, p. 100356, 2019.

VANDERROOST, M.; RAGAERT, P.; DEVLIEGHERE, F.; et al. Intelligent food packaging: The next generation. **Trends in Food Science and Technology**, v. 39, n. 1, p. 47–62, 2014.

VIDAL, O. L.; BARROS SANTOS, M. C.; BATISTA, A. P.; et al. Active packaging films containing antioxidant extracts from green coffee oil by-products to prevent lipid oxidation. **Journal of Food Engineering**, v. 312, 2021.

WANG, J.; LIU, S.; HUANG, J.; et al. A review on polyhydroxyalkanoate production from agricultural waste Biomass: Development, Advances, circular Approach, and challenges. **Bioresource Technology**, v. 342, p. 126008, 2021.

YONG, H.; WANG, X.; BAI, R.; et al. Development of antioxidant and intelligent pH-sensing packaging films by incorporating purple-fleshed sweet potato extract into chitosan matrix. **Food Hydrocolloids**, v. 90, p. 216–224, 2019.

YU, Z.; DHITAL, R.; WANG, W.; et al. Development of multifunctional nanocomposites containing cellulose nanofibrils and soy proteins as food packaging materials. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 21, p. 100366, 2019.

ZHANG, H.; SABLANI, S. Biodegradable packaging reinforced with plant-based food waste and by-products. **Current Opinion in Food Science Elsevier Ltd**, v 42, p. 61-68, 2021.