

O IMPACTO DO PLÁSTICO E A NECESSIDADE DE INOVAÇÃO: uma revisão de literatura sob o olhar da utilização das proteínas do soro de leite como alternativa polimérica

**Marcus Tulio Cunha dos Santos Filho^{1*}, Clara Suprani Marques², Rafaela Corrêa
Pereira³, Thais Andrade Esméria⁴, Mateus Vinícius Carvalho Simões⁵**

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí*, Bambuí, Minas Gerais, Brasil, ORCID: 0000-0002-1947-6274, E-mail: mtcsfilho@gmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – *Campus Campo Novo do Parecis*, Campo Novo do Parecis, Mato Grosso, Brasil, ORCID: 0000-0002-1379-2970, E-mail: clara.marques@ifmt.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí*, Bambuí, Minas Gerais, Brasil, ORCID: 0000-0001-8795-6109, E-mail: rafaela.correa@ifmg.edu.br

⁴ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – *Campus Diamantina*, Diamantina, Minas Gerais, Brasil, ORCID: 0009-0003-7999-8677, E-mail: thais.esmeria@ufvjm.edu.br

⁵ Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil, ORCID: 0009-0005-5439-1590, E-mail: mateusvini3004@gmail.com

RESUMO

As embalagens de alimentos asseguram a comunicação entre indústria e consumidor ao mesmo tempo que asseguram a inocuidade e protegem o alimento. Dada a versatilidade dos materiais plásticos, aliado ao seu baixo custo, embalagens plásticas são amplamente empregadas na indústria de alimentos. Com o crescimento populacional e a necessidade intrínseca de aumento na produção de alimentos para suprir a demanda, a produção de dejetos plásticos inevitavelmente aumentou. Contudo, por não serem materiais biodegradáveis, a sobrecarga nos métodos de gerenciamento e manejo de embalagens plásticas, bem como seu descarte inadequado na natureza, acabam por gerar graves consequências ambientais. Tais fatores instigam a modernização no setor de embalagens, no tocante a busca por materiais alternativos ao plástico e que sejam menos agressivos ambientalmente. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma revisão de literatura à respeito da problemática do plástico atualmente, dando um enfoque no uso de biopolímeros como alternativa sustentável, em especial a aplicação das proteínas de soro de leite, para elaboração de filmes biodegradáveis.

Palavras-chave: Embalagens; Bioplástico; Polímeros; Soro de Leite

INTRODUÇÃO

No setor alimentício, as embalagens assumem um papel estratégico na comunicação entre indústria e consumidor, contendo informações essenciais sobre o produto a ser consumido e a melhor forma de armazená-lo. Além de sua função comunicativa, a embalagem protege o alimento ao longo de toda a cadeia até o consumidor final de ameaças externas e assegura sua inocuidade. Novas regulamentações, aliadas às exigências de um consumidor mais crítico e consciente, estimulam a indústria de alimentos a modernizar suas embalagens, não apenas como atributo de diferenciação, mas como fator relevante para sua permanência no mercado.

O mercado de embalagens é influenciado por uma gama de fatores e englobam aspectos socioeconômicos, políticos, culturais e ambientais (Sarantopoulos *et al.*, 2020). De forma isolada ou em conjunto, eles serviram de estímulo para comunidade tecnocientífica a buscarem meios de amenizar os impactos ou suprir as demandas oriundas deles.

Quanto a sustentabilidade das embalagens plásticas, inerentes no cotidiano do consumidor, o manejo e tratamento inadequado dos dejetos oriundos de seu consumo e o impacto causado por eles têm estimulado à busca por inovações e alternativas a esse tipo de material (OCDE, 2022). O uso de polímeros biodegradáveis como material base para elaboração de embalagens, especialmente aplicados em filmes ou revestimentos comestíveis (Fredri e Dorigato, 2021).

Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma revisão de literatura sobre o plástico e o seu impacto ambiental, o uso de bioplásticos e das proteínas do soro de leite como alternativa polimérica.

O IMPACTO AMBIENTAL DO PLÁSTICO

Os conceitos de polímeros e plástico são por vezes confundidos. Os polímeros são macromoléculas de cadeia longa, formadas por subunidades químicas (meros) que se repetem ao longo da cadeia, estas podendo ser do mesmo tipo (homopolímeros) ou não (copolímeros) (Mendes, 2009). Moléculas poliméricas podem ser encontradas naturalmente, como por exemplo: polissacarídeos (amido); proteínas (queratinas); poliésteres; DNA (nucleotídeo), entre outras (Tong, 2020); bem como podem ser sintetizadas, por meio de reações de polimerização, nas quais monômeros sofrem alterações (por aquecimento, pressão e/ou aplicação de aditivos) e originam os meros, que irão se unir (Machado *et al.*, 2007).

Neste contexto, Medeiros (2005) descreve os materiais plásticos como um grupo de materiais artificiais de origem orgânica sintética que adquirem a condição plástica mediante aplicação de calor e pressão durante sua moldagem. É imperativo observar que, embora

plásticos sejam, de fato, estruturas poliméricas, nem todos os polímeros são materiais plásticos. Podemos classificar os plásticos como termoplásticos ou termofixos (Medeiros, 2005).

Em 1865, o metalurgista e inventor inglês Alexander Parkes patenteou o que seria o primeiro plástico semissintético já produzido: o termoplástico nitrocelulose, oriundo do tratamento da celulose com ácido nítrico, ao qual chamou de parkesina. A facilidade com a qual o material se deformava, juntamente com sua alta inflamabilidade, inviabilizaram sua comercialização. O americano John Wesley Hyatt, em 1870, ao combinar a parkesina com canfora em pó, obteve um produto mais estável, ao qual chamou de celuloide (Rasmussen, 2021).

Contudo, foi somente em 1907 que a combinação de fenol e formaldeído resultou no primeiro plástico sintético, um termofixo chamado de baquelite, em homenagem ao seu 12 inventor, o químico Belga-americano Leo Baekeland (Geyer, 2020a). Segundo Geyer (2020a) a produção de plástico foi estimulada durante a Segunda Guerra Mundial, devido à escassez dos materiais usados na época. Quando a guerra acabou, o estilo de vida do pós-guerra, centrado em produção em massa, favoreceu o desenvolvimento da indústria plástica.

A versatilidade dos materiais plásticos justifica sua importância na sociedade moderna. Van Emmerick e Schawarz (2019) amparam a popularidade crescente destes materiais no século XX em suas propriedades vantajosas para a indústria, como: baixo custo; durabilidade; estabilidade; resiliência; leveza; e a possibilidade de serem moldados em diversos formatos. As aplicações destes polímeros, portanto, são diversas: os plásticos são utilizados em roupas, embalagens para alimentos, eletrônicos, materiais de construção, suprimentos médicos, entre outras (Alabi *et al.*, 2019).

Esses fatores, aliados ao crescimento populacional exponencial da última década e melhores remunerações, impulsionaram a produção de plásticos nas últimas duas décadas (OCDE, 2022). Dados do panorama Global Plastic Outlook, publicado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), estimam que a produção de plástico dobrou de 234 milhões para 460 milhões de toneladas entre 2000 e 2019.

Os dejetos plásticos também dobraram neste período, indo de 156 milhões para 353 milhões de toneladas. A OCDE (2022) estima que cerca de dois terços dos dejetos são oriundos de aplicações de curta vida útil, como embalagens (40%), produtos de consumo (12%) e têxteis (11%). Dado o rápido consumo desses produtos, grandes volumes de dejetos são produzidos rapidamente, sobrecarregando os sistemas de manejo de resíduos.

Sohn *et al.* (2020) apontam a reciclagem, a reutilização, a incineração e o despejo em aterros sanitários como métodos tradicionais de manejo de resíduos. Contudo, no ano de

2019, por exemplo, somente 9% dos dejetos plásticos foram reciclados (OCDE, 2022). Esse desempenho irrisório é consequência de um gerenciamento e coleta de lixo deficiente, aliados à baixa viabilidade econômica do processo de reciclagem (Ajibade *et al.*, 2021).

O reprocessamento desses materiais não é algo simplório. A qualidade do material varia dependendo do tipo de processo ao qual ele foi submetido. Conforme Geyer (2020b) os dejetos plásticos podem ser reprocessados mecanicamente ou quimicamente: no primeiro, os dejetos triturados ou moídos são limpos, descontaminados e recompostos em grânulos; no segundo, os dejetos pré-tratados são despolimerizados e repolimerizados em um novo material.

O tratamento mecânico é o mais utilizado atualmente para reciclar plástico, sobretudo os materiais termoplásticos (Geyer, 2020b). Contudo, as mudanças drásticas nas características físico-químicas desses materiais ao longo de sucessivos ciclos de reciclagem limitam seu valor comercial e, em última análise, sua utilização (Ali *et al.*, 2021). O processo químico, por sua vez, produz materiais de melhor qualidade, porém, o custo do processamento, o seu impacto ambiental e a eficiência dos catalizadores são fatores limitantes (Ru *et al.*, 2020).

Independentemente do processo, no entanto, as propriedades físicas, mecânicas e estéticas dos materiais reciclados geralmente são inferiores aos dos materiais virgens (Sohn *et al.*, 2020).

Em 2019, cerca de 19% dos dejetos plásticos foram incinerados (OCDE, 2022). A maior preocupação quanto a esse método é o potencial poluidor atmosférico inerente do processo, sobretudo pelos vapores químicos nocivos emitidos (Alabi *et al.*, 2019).

A Tabela 1 apresenta alguns compostos gerados durante a incineração de policloreto de vinila (PVC) e seus respectivos efeitos na saúde, podendo ser consultada a seguir:

Tabela 1 – Compostos gerados durante a incineração de PVC e seus efeitos nocivos à saúde.

Composto gerado	Efeitos nocivos à saúde
Acetaldeído	Danifica o sistema nervoso, causando lesões
Acetona	Irrita os olhos e o trato respiratório
Benzaldeído	Irrita a pele, olhos, sistema respiratório e limita a função cerebral
Benzol	Carcinogênico, afeta a medula óssea, fígado e sistema imunológico
Formaldeído	Carcinogênico, promove danos oculares, pode causar edema pulmonar

Fosgênio	Usado na Primeira Guerra Mundial, corrosivo aos olhos, pele e órgãos respiratórios
Dibenzodioxinas policloradas	Carcinogênico, irrita a pele e o sistema respiratório, danifica o sistema digestivo e nervoso, fígado e medula óssea
Dibenzofuranos policlorados	Irrita os olhos e o sistema respiratório, causa asma
Ácido clorídrico	Corrosivo aos olhos, a pele e ao trato respiratório
Salicilaldeído	Irrita a pele, olhos e o trato respiratório, pode afetar o sistema nervoso central
Tolueno	Irrita os olhos e o trato respiratório, pode causar depressão
Xileno	Irrita os olhos, pode afetar o sistema nervoso central, reduz o nível de consciência e prejudica a capacidade de aprendizado
Propileno	Danifica o sistema nervoso central
Cloreto de vinila	Carcinogênico, irrita os olhos, pele e sistema respiratório, pode afetar o sistema nervoso central, fígado, baço e órgãos formadores de sangue

Adaptado de: Hammed *et al.*, 2020.

Segundo Hameed *et al.* (2020), durante a incineração de plástico, há a produção de cinzas e fuligens, que acabam por recobrir a superfície de plantas, corpos d'água e solo. Chuvas podem potencialmente fazer com que o solo absorva esses compostos tóxicos, intoxicando águas subterrâneas e promovendo a absorção destes compostos por plantas, incorporando-os na cadeia alimentar (Alabi *et al.*, 2019).

Conforme a OCDE (2022), o destino principal dos dejetos plásticos são os aterros sanitários, responsáveis de captar cerca de 50% do volume gerado. Ru *et al.* (2020) argumentam que tal preferência deste método frente aos demais se deve ao baixo custo de operação, embora necessite de grandes espaços para operar. A depender do espaço disponível, esse tipo de operação pode não se tornar viável, como é o caso de países como Japão, Suécia e Dinamarca, que possuem amplas unidades de incineração (Alabi *et al.*, 2019).

Alabi *et al.* (2019) dissertam que a degradação biótica (ou biodegradação, ocasionada por ação de microrganismos) e abiótica (ocasionada por fatores ambientais, como exposição à luz e temperatura) dos plásticos em aterros sanitários promovem o vazamento de

seus aditivos em solos e leitos subterrâneos, contaminando-os. Tradicionalmente, os materiais plásticos são derivados, majoritariamente, de compostos petroquímicos, estes em grande parte não-biodegradáveis (Acquavia *et al.*, 2021). Dessa forma, o acúmulo de plástico a longo prazo tende a tornar os aterros sanitários uma solução ineficiente de manejo de dejetos.

O descarte inadequado de plástico também é recorrente: a OCDE (2022) estimou que 22% dos dejetos plásticos produzidos em 2019 foram descartados em lixões clandestinos, queimados em poços abertos ou vazados para o meio ambiente. Estes dejetos, descartados inadequadamente, ao serem submetidos a processos naturais como fotodegradação por radiação ultravioleta (UV) e abrasões mecânicas, são fragmentados em pedaços menores (Ajibade *et al.*, 2021). Gabbott *et al.* (2020) classificam os dejetos plásticos no ambiente natural conforme o seu tamanho, sendo estes, em ordem decrescente de tamanho, denominados macro-, meso-, micro- e nanoplásticos.

Os microplásticos (MP) (partículas micrométricas variando de 1 a 5000 μm) vêm ganhando maiores atenções devido à alarmante quantidade observada nos oceanos, estimada em 236.000 toneladas (Hale *et al.*, 2020). Dentre as fontes poluidoras dos ecossistemas aquáticos, Thushari e Senevirathna (2020) estimam que cerca de 75% sejam oriundas de atividades terrestres, como turismo, atividades portuárias, atividades residenciais e entrada de água doce contaminada. Dada a evidente interconectividade entre os ecossistemas aquáticos e terrestres, a problemática envolvendo esses dejetos no oceano é um reflexo da ineficiência dos métodos de gerenciamento de lixo.

De acordo com Hameed *et al.* (2020), os MPs são capazes de atravessar barreiras e membranas celulares, desta forma afetando várias funções nos organismos dos animais marinhos, como hábitos alimentares e a capacidade de reprodução. A ingestão e o estrangulamento por MPs também são problemas recorrentes e, quando não letais, efeitos como perda de sensibilidade, mobilidade, crescimento reduzido e incapacidade de fugir de predadores são observados (Thushari e Senevirathna, 2020).

Em resposta aos problemas ambientais supracitados, a comunidade acadêmica e industrial tem, nos últimos anos, buscado implementar novas tecnologias em toda cadeia produtiva para amenizar a crise plástica. Segundo a OCDE (2022), as inovações tecnológicas mais relevantes ambientalmente podem ser enquadradas em três categorias: tecnologias de prevenção e reciclagem; de conversão ou descarte de resíduos e remoção de vazamentos; utilização de matéria-prima de base biológica. A Tabela 2 apresenta a classificação de algumas tecnologias e atitudes emergentes quanto as categorias supracitadas, a seguir:

Tabela 2 – Classificação de algumas tecnologias e atitudes emergentes quanto às categorias de inovação.

Tecnologias de Prevenção e Reciclagem	
Prevenção	Reciclagem
Projetos visando uma maior vida útil, leveza ou reciclagem	Classificação de resíduos plásticos Reciclagem mecânica Uso de tecnologias digitais
Reutilização e reparo	Reciclagem química de plástico para plástico
Tecnologias de conversão ou descarte de resíduos e remoção de vazamentos	
Conversão ou descarte de resíduos	Remoção de vazamentos
Plásticos biodegradáveis	Atenuação da liberação de resíduos na natureza
Conversão de plásticos em combustível	Tratamento de águas residuais
Conversão de plástico em energia	Monitoramento e remoção de resíduos na natureza
Utilização de matéria-prima de base biológica	
Fonte de matéria-prima	
Matéria-prima de origem vegetal	
Matéria-prima à base de algas	
Matéria-prima à base de fungos	
Outros tipos de biomassas	
Adaptado de: OCDE, 2022	

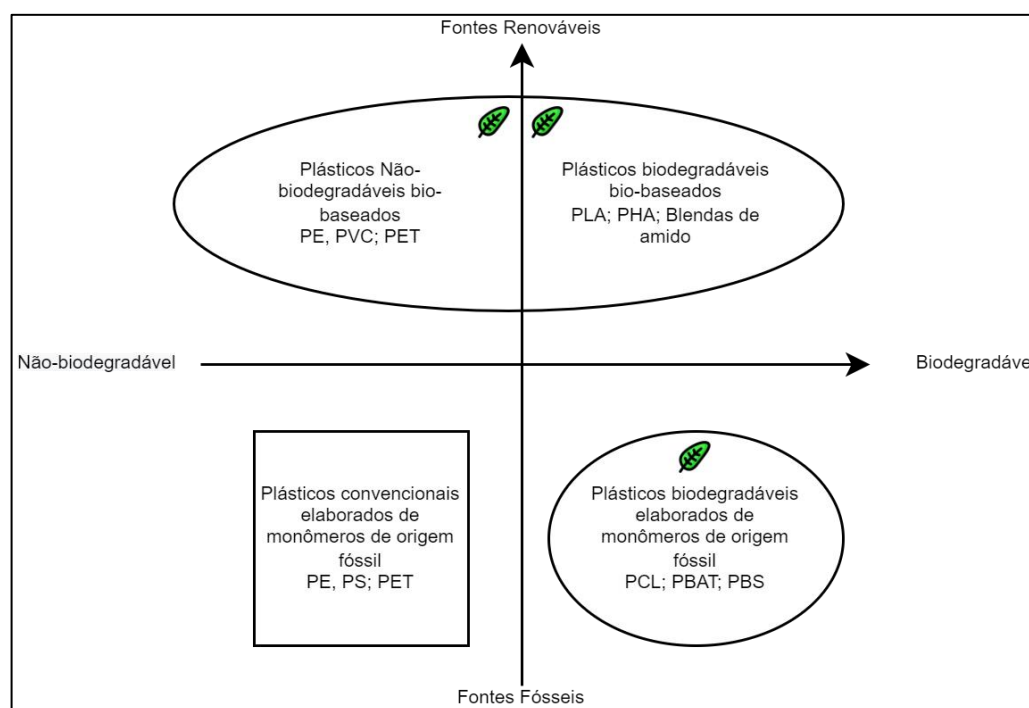
Como pode ser observado no Quadro 2, uma tecnologia emergente na conversão ou descarte de resíduos é a elaboração de plásticos biodegradáveis. O conceito de biodegradação plástica, conforme Ali *et al.* (2021), é dado como a conversão da matriz polimérica do material plástico em biogás e biomassa, por microrganismos aeróbicos que possam usar esses polímeros como fonte de carbono para seu desenvolvimento. Como os plásticos tradicionais não são biodegradáveis, a elaboração de bioplásticos tem ganhado destaque nos últimos anos (Fredri e Dorigato, 2021).

BIOPLÁSTICO E SUAS APLICAÇÕES

Atualmente, é possível observar um grande esforço na busca por uma solução mais ecológica para crise plástica observada nas últimas décadas. Dentre os principais motivadores, estão as limitações atuais dos sistemas de coleta e tratamento dos dejetos plásticos; a origem não-renovável e não-biodegradável da maior parte dos plásticos comercializados (Sohn *et al.*, 2020); e a pressão governamental por meio da imposição de regulamentações e da opinião pública frente aos problemas ambientais e possíveis danos à saúde da população (Sohn *et al.*, 2020; Rhein e Schmid, 2020).

Uma alternativa em foco nos últimos anos são os bioplásticos (Fredri e Dorigato, 2021). O termo bioplástico refere-se não somente aos materiais plásticos bio-baseados (termo adaptado do inglês *bio-based*), tendo em vista que há exemplares destes que não são biodegradáveis (como o polietileno verde), mas também aos plásticos de origem petroquímica que são biodegradáveis (como o polivinil álcool) (Folino *et al.*, 2020). Desta maneira, Jögi *et al.* (2020) ressaltam que, para que um material seja considerado um bioplástico, este deve apresentar como características ser biodegradável e/ou feito a partir de fontes renováveis (bio-baseado). A Figura 1 apresenta a classificação dos materiais plásticos baseadas em sua origem e biodegradabilidade:

Figura 1 – Classificação dos materiais plásticos baseados em sua origem e biodegradabilidade.



Adaptado de: OCDE, 2022

Dados apresentados pela *European Bioplastic* (2022) estimam que a produção de bioplásticos no ano de 2022 foi de 2,2 milhões de toneladas, um crescimento de cerca de 23,72% quando comparada a produção de 2021, de 1,8 milhões de toneladas. Da produção de 2022, 51,50% consistiu em materiais plásticos biodegradáveis, enquanto o restante (48,50%) correspondeu aos materiais bio-baseados/não-degradáveis (*European Bioplastic*, 2022).

Segundo Caicedo *et al.* (2023), os polímeros para elaboração de materiais bio-baseados podem ser extraídos da biomassa, sintetizados através da fermentação de microrganismos ou sintetizados quimicamente. O Quadro 3 reúne alguns polímeros utilizados na fabricação de bioplásticos e suas origens:

Quadro 3 – Classificação dos materiais plásticos baseados em sua origem e biodegradabilidade.

Polímeros		
Plantas	Microrganismos	Animais
Celulose e seus derivados (polissacarídeo)	Polihidroxialcanoatos (poliésteres)	Quitina (polissacarídeo)
Lignina	Celulose bacteriana	Quitosana (polissacarídeo)
Amido e seus derivados (polissacarídeo)	Ácido hialurônico (polissacarídeo)	Ácido hialurônico (polissacarídeo)
Alginato (polissacarídeo)	Goma xantana (polissacarídeo)	Caseína (proteína)
Glúten (proteína)	Goma curdlana (polissacarídeo)	Proteínas do soro do leite
Gomas	Pululano (polissacarídeo)	Colágeno (proteína)
Carragena	Goma gelana (polissacarídeo)	Albumina (proteína)
Zeína	Exopolissacarídeos	Queratina

(proteína)

(proteína)

Couro

(proteína)

Adaptado de: Ibrahim *et al.*, 2021.

As aplicações destes materiais são variadas. No setor energético, Sadasivuni *et al.* (2019) destacam o esforço de companhias de energia por substituir peças de origem petroquímicas por bioplásticos em painéis fotovoltaicos; Malkar *et al.* (2023) destacam a aplicação de bioplásticos no setor de esportes e lazer, como material para tenda de acampar, brinquedos, pranchas e skates, bolas de futebol entre outras aplicações; Söylemez *et al.* (2023) destacam a utilização de bioplásticos reforçados de fibras naturais em interiores de automóveis, painéis isolantes, retardantes de chamas, tecidos, entre outras aplicações.

O maior segmento de mercado de bioplásticos no ano de 2022 foi o de embalagens (rígidas e flexíveis), responsável por 48,0% do mercado daquele ano; seguido pelos segmentos de fibras (tecidos e não-tecidos) (14,8%) e bens de consumo (14,1%) (European Bioplastic, 2022). Especificamente na área de alimentos, Teoh *et al.* (2023) e Caicedo *et al.* (2023) destacam a utilização de bioplásticos incorporados com compostos naturais/inorgânicos em embalagens ativas e/ou inteligentes. Embalagens inteligentes (EI) são integradas a um sensor que detecta compostos específicos, indicando ao consumidor atributos de qualidade dos alimentos, como frescor, contaminação microbiana, entre outros (Teoh *et al.*, 2023).

As embalagens ativas (EA), por sua vez, são projetadas visando um sistema de embalagem mais eficiente, usando aditivos seja no material ou no espaço livre da embalagem para atingir esse fim. Sharma *et al.* (2021) dividem as embalagens ativas em dois grupos de acordo com o tipo de aditivo utilizado: quimioativas e bioativas. Em embalagens quimioativas, agentes químicos são utilizados, impactando a química do alimento embalado e a atmosfera dentro da embalagem. Embalagens bioativas, por sua vez, utilizam agentes antimicrobianos ou antioxidantes naturais, que interagem com o alimento e possibilitam a inibição de microrganismos e/ou a minimização de ocorrência de reações oxidativas (Sharma *et al.*, 2021).

Segundo Teoh *et al.* (2023) as funções gerais das EAs e EIs giram em torno da atividade antioxidante e antimicrobiana (remoção de radicais livres e inibição de crescimento microbiano); da absorção/emissão de gases (como oxigênio, etileno, dióxido de carbono); da indicação de frescor e/ou qualidade (mudança de cor em função da presença de gases ou variação de pH).

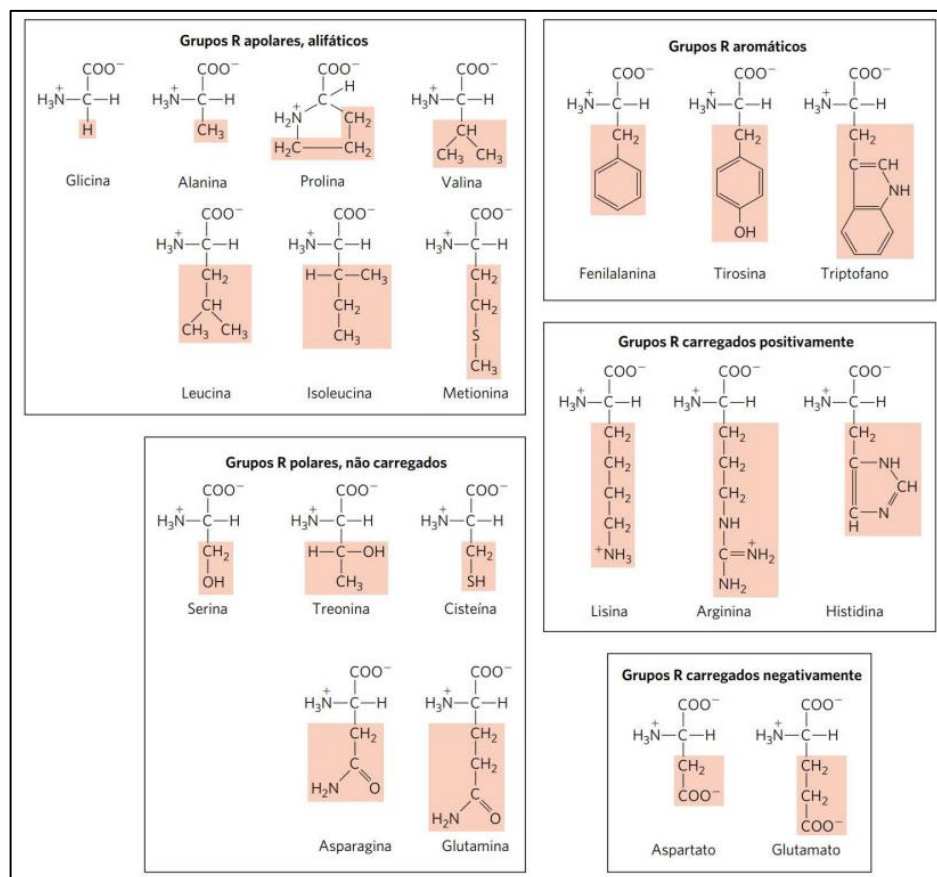
Para tanto, são adicionados aditivos que promovam tais características. Caicedo *et al.* (2023) apontam o uso de fibras vegetais no aprimoramento das propriedades mecânicas dos bioplásticos; o uso de extratos de plantas e óleos essenciais na manutenção da qualidade microbiológica e nutricional dos produtos alimentícios à longo prazo; e o uso de materiais inorgânicos (como nanocelulose ou nanoargila) no aprimoramento de propriedades térmicas e de barreira dos materiais plásticos.

PROTEÍNAS

Polímeros de aminoácidos, as proteínas podem servir de matriz polimérica para elaboração de bioplásticos. Conforme Nelson e Cox. (2019), as proteínas são constituídas por até 20 aminoácidos comuns, cuja estrutura geral consiste em um grupo amina, um grupo carboxila, um átomo de hidrogênio e um grupo R ligados à um carbono quiral. O grupo R varia de acordo com a estrutura, tamanho e carga elétrica, afetando a polaridade dos aminoácidos e, desta forma, classificá-los de acordo com o grupo R é possível (Nelson e Cox, 2019).

A Figura 2, a seguir, apresenta as fórmulas estruturais dos 20 aminoácidos e sua classificação em seus respectivos grupos:

Figura 2 – Fórmulas estruturais dos aminoácidos comuns e suas classificações quanto grupo R (regiões sombreadas de rosa).



Adaptado de: Nelson e Cox, 2019.

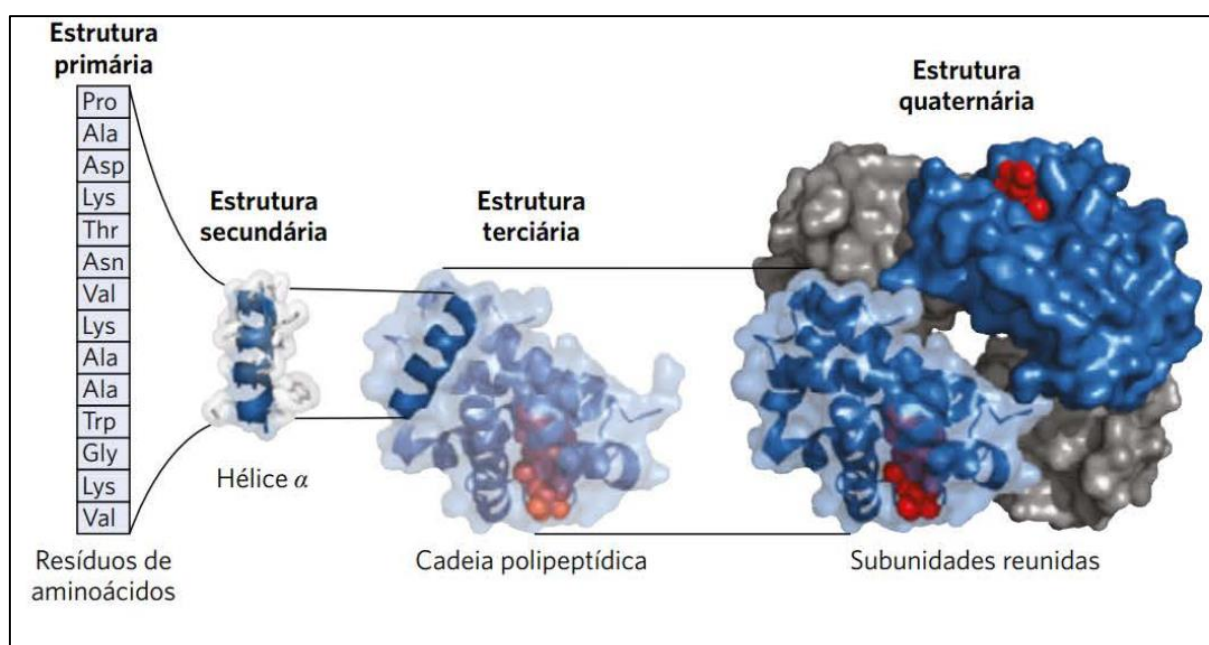
Conforme a Figura 2, os aminoácidos são enquadrados em 5 grupos principais, sendo estes (Nelson e Cox, 2019):

- grupos R apolares, alifáticos: os aminoácidos destes grupos são apolares e hidrofóbicos;
- grupos R aromáticos: os aminoácidos destes grupos são relativamente hidrofóbicos (apolares);
- grupos R polares, não carregados: os aminoácidos destes grupos são mais hidrofílicos que os apolares, dado que possuem grupos funcionais que fazem ligações de hidrogênio com a água;
- grupos R carregados positivamente: são hidrofílicos e apresentam carga positiva significativa em pH 7;
- grupos R carregados negativamente: são hidrofílicos e apresentam carga negativa significativa em pH 7

Estruturalmente, as proteínas são organizadas em quatro níveis estruturais: primária; secundária; terciária e quaternária. A estrutura primária refere-se à sequência de

aminoácidos unidos por ligações covalentes (ligações peptídicas e dissulfeto, principalmente), sendo responsável pela definição da função das proteínas. A estrutura secundária descreve o arranjo espacial dos átomos de um segmento da cadeia principal, desconsiderando a posição de cadeias laterais ou outros segmentos. A estrutura terciária, por sua vez, leva em consideração o arranjo espacial de toda cadeia polipeptídica, sendo as proteínas classificadas em fibrosas (estruturas secundárias se repetem) ou globulares (estruturas secundárias diversas). Por fim, a estrutura quaternária refere-se ao arranjo espacial de duas ou mais subunidades polipeptídicas (Nelson e Cox, 2019; Salleh *et al.*, 2023). A Figura 3, a seguir, exemplifica os níveis de estrutura nas proteínas.

Figura 3 – Níveis estruturais das proteínas.



Adaptado de: Nelson e Cox, 2019.

Conforme Harnkarnsujarit *et al.* (2021), em sua forma nativa, a temperatura de amolecimento (onde mudanças nas propriedades físicas são visíveis) das proteínas são superiores à temperatura de decomposição, graças às fortes interações entre as cadeias. Para fins de processamento desses polímeros em embalagens, faz-se necessário modificações na estrutura das proteínas para se atingir as propriedades físico-químicas e mecânicas desejáveis (Harnkarnsujarit *et al.*, 2021).

A desnaturação proteica geralmente é o primeiro passo para elaboração de embalagens de base proteica (Harnkarnsujarit *et al.*, 2021). Nelson e Cox. (2019) descrevem a desnaturação como um processo de modificação da estrutura tridimensional que ocasiona a

perda da função da proteína. A desnaturação expõe grupos hidrofóbicos outrora indisponíveis no interior das proteínas, que irão se reorientar e rearranjar, através de ligações não-covalentes e covalentes, formando redes poliméricas irreversíveis. Conforme Harnkarnsujarit *et al.* (2021), parâmetros como pH, binômio tempo/temperatura e a adição de aditivos influenciam as propriedades e características das proteínas e, consequentemente, das embalagens obtidas.

Caicedo *et al.* (2023) destacam o baixo custo, a biodegradabilidade, a capacidade de formação e coesão de filmes e o bom efeito de barreira contra gases características que tornam o emprego de proteínas algo interessante. Em contrapartida, os filmes elaborados tendem a ser altamente permeáveis ao vapor d'água, dada a natureza hidrofílica das proteínas (Caicedo *et al.*, 2023)

PROTEÍNAS DO SORO DE LEITE

Singh *et al.* (2023) destacam o uso de resíduos biológicos de diferentes indústrias como matéria-prima para produção de bioplásticos, como da indústria açucareira, agroflorestral, cafeeira e de laticínios. Nesse contexto, o soro de leite, coproduto da produção de queijos, vem ganhando destaque nos últimos anos, sobretudo na elaboração de produtos com alto valor agregado, como os concentrados proteicos (Argenta e Scheer, 2019).

De acordo com Wijayanti *et al.* (2019), o principal constituinte das proteínas do soro do leite são as β -lactoglobulinas (β -lg), representando cerca de 50% das proteínas totais do soro, seguidas das α -lactoalbuminas (α -la, ~20%), das imunoglobulinas (Igs, ~12%) e das albuminas séricas bovina (BSA, ~8%). Além disso, tem-se os compostos minoritários (10%), constituídos de lactoferrinas, lactoperoxidases e lisozimas. Por se tratar dos dois maiores constituintes das proteínas do soro do leite e dada a contribuição para formação da matriz polimérica dos filmes à base de soro de leite, a β -lg e a α -la serão mais bem descritas a seguir.

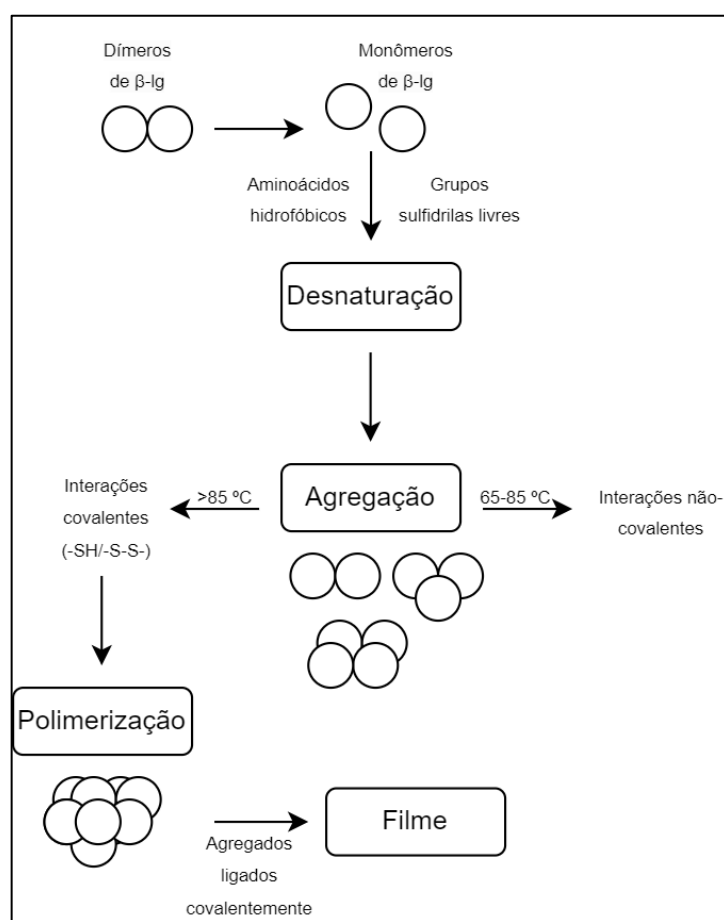
A β -lg é composta por 162 aminoácidos e tem um peso molecular de cerca de 18.000 Da. Essa proteína apresenta em sua composição duas cistinas (dímeros de cisteína) e uma cisteína com um grupo sulfidrila (-SH) livre na posição 121, que se encontram no interior da molécula. A β -lg apresenta α -hélices, folhas- β e outras estruturas em forma de bobinas, estruturas secundárias que conferem o caráter globular às β -lg's. Em condições fisiológicas, as β -lg's apresentam-se na forma de dímeros, totalizando um peso molecular de aproximadamente 36.000 Da (Deeth e Bansal, 2019).

A α -la é composta por 123 aminoácidos e tem um peso molecular de 14.178 Da. Essa proteína possui quatro cistinas e nenhum grupo sulfidrila livre, ao contrário do que ocorre na β -lg. A α -la apresenta uma estrutura bilobular: um lóbulo apresenta α -hélices; e o outro

lóbulo, por sua vez, é composto por folhas- β e outras estruturas desordenadas. Os lóbulos são ligados entre si por meio de ligações de cálcio, o que contribui para a estabilidade térmica das α -la's (Deeth e Bansal, 2019).

Por ser o constituinte majoritário, as β -lg's possuem papel fundamental na gelificação e no comportamento de agregação na produção de filmes bioplásticos (Schmid e Müller, 2019). A Figura 4 apresenta o processo de desnaturação induzida pelo calor da β -lg segundo Wijayanti *et al* (2019):

Figura 4 – Processo de desnaturação induzida pelo calor da β -lg.



Adaptado de: Wijayanti *et al*, 2019.

Conforme a Figura 4, o processo de desnaturação e agregação das β -lg's começa com a dissociação dos dímeros de β -lg em monômeros. A exposição dos aminoácidos hidrofóbicos e do grupo sulfidril (-SH) presentes acarretam a desnaturação da β -lg e na formação de monômeros reativos. Esses monômeros vão interagir entre si: em temperaturas no intervalo de 65 a 85 °C, ligações não-covalentes são favorecidas; em temperaturas superiores a 85 °C, a agregação via ligações covalentes entre grupos dissulfeto e sulfidrilas ocorre

preferencialmente. Esses agregados irão se polimerizar, formando agregados de peso molecular cada vez maior. O fim da polimerização é indicado pela formação de matrizes poliméricas (como é o caso dos filmes bioplásticos).

Segundo Schmid e Müller (2019), o grau de desnaturação das proteínas do soro do leite é determinado pela β -lg, dado que: é a maior fração proteica; os grupos sulfídricos livres, presentes somente nas β -lg's, induzem a quebra das ligações dissulfídicas presentes nas α -la's e em outras proteínas do soro, contribuindo para a agregação dos polímeros.

O uso das proteínas de soro do leite em sua forma nativa para elaboração de filmes também é possível (Schmid e Müller, 2019; Wang *et al.*, 2019). Conforme discutido por Wang *et al.* (2019), a solubilidade e a permeabilidade de oxigênio dos filmes de proteínas nativas são superiores em comparação aos elaborados com proteínas desnaturadas; entretanto, as propriedades de tensão dos filmes de proteínas desnaturadas são superiores, com a rigidez, força e elasticidade aumentando conforme o tempo e a temperatura do processo aumentam.

Contudo, os filmes formulados com proteínas desnaturadas podem apresentar-se frágeis após o processamento, devido às ligações cruzadas excessivas na matriz polimérica, sobretudo pelas ligações dissulfeto (Schmid e Müller, 2019). Para evitar esse problema, são adicionados plastificantes na formulação. Wang *et al.* (2019) definem plastificantes como substâncias com alto ponto de ebulição, substancialmente não voláteis que, quando adicionadas a outro material, alteram suas propriedades físicas e/ou mecânicas. Por serem moléculas pequenas em comparação aos polímeros, os plastificantes irão se alojar entre as cadeias poliméricas, diminuindo a interação proteína-proteína e aumentando a mobilidade do material, aprimorando sua elasticidade (Wang *et al.*, 2019).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí*, pela qualidade ímpar de seus docentes e por todos os participantes deste trabalho, sem os quais ele não se concretizaria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACQUAVIA, M. A. *et al.* Natural polymeric materials: A solution to plastic pollution from the agro-food sector. **Polymers**, 13(1), 158, 2021.

AJIBADE, F. O. *et al.* Environmental pollution and their socioeconomic impacts. In: Kumar A. *et al.* **Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants**. Woodhead Publishing, 321-354, 2021.

- ALABI, O. A. *et al.* Public and Environmental Health Effects of Plastic Waste Disposal: A Review. **Journal of Toxicology and Risk Assessment**, 5(2), 1-13, 2019.
- ALI, S. S. *et al.* Plastic wastes biodegradation: mechanisms, challenges and future prospects. **Science of the Total Environment**, 780, 146590, 2021.
- ARGENTA, A. B.; SCHEER, A. P. Membrane separation processes applied to whey: A review. **Food Reviews International**, 36(5), 499-528, 2019.
- CAICEDO, C. *et al.* Biobased and Biodegradable Packaging Plastics for Food Preservation. In: INAMUDDIN; ALTALHI, T. **Handbook of Bioplastics and Bio composites Engineering Applications**. 2 ed. Hoboken: WILEY, 383-424, 2023.
- DEETH, H. C.; BANSAL, N. Whey Proteins: An Overview. In: DEETH, H. C.; N. BANSAL. **Whey Proteins: From Milk to Medicine**. Londres: Academic Press, 1-50, 2019.
- EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics Market Development Update 2022**. Hürth: European Bioplastics, 1-2, 2022.
- FOLINO, A. *et al.* Biodegradation of wasted bioplastics in natural and industrial environments: A review. **Sustainability**, 12(15), 6030, 2020.
- FREDI, G.; DORIGATO, A. Recycling of bioplastic waste: A review. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, 4(3), 159-177, 2021.
- GABBOTT, S. *et al.* The geography and geology of plastics: their environmental distribution and fate. In: LETCHER, T. M. **Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions**. Londres: Academic Press, 33-55, 2020.
- GEYER, R. A Brief History of Plastics. In: STREIT-BIANCHI, M. *et al.* **Mare Plasticum – The Plastic Sea: Combatting Plastic Pollution Through Science and Art**. Suíça: Springer Cham, 31-49, 2020a.
- GEYER, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. In: LETCHER, T. M. **Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions**. Londres: Academic Press, 13-32, 2020b.
- HALE, R. C. *et al.* A global perspective on microplastic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 125(1), e2018JC014719, 2020.
- HAMMED, M. *et al.* White pollution: a hazard to environment and sustainable approach to its management. In: BHAT, R. A.; WANI, K. A. **Innovative Waste Management Technologies for Sustainable Development**. Hershey: IGI Global, 52-81, 2020.
- HARNKARNSUJARIT, N. *et al.* Bioplastic for Sustainable Food Packaging. In: GALANAKIS, C. M. **Sustainable Food Processing and Engineering Challenges**. Londres: Academic Press, 203-277, 2021.

- IBRAHIM, N. I. *et al.* Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. **Coatings**, 11(11), 1423, 2021.
- JÕGI, K.; BHAT, R. Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, 18, 100326, 2020.
- MACHADO, F. *et al.* Uma revisão sobre os processos de polimerização em suspensão. **Polímeros**, 17(2), 166-179, 2007.
- MALKAR, R. *et al.* Applications of Bioplastic in Sports and Leisure. In: INAMUDDIN; ALTALHI, T. **Handbook of Bioplastics and Bio composites Engineering Applications**. 2 ed. Hoboken: WILEY, 299-316, 2023.
- MEDEIROS, O. M. **Alternativas de Ultimação de Resíduo Plástico Termofixo**. 2005. Tese (doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.
- MENDES, F. M. **Produção e caracterização de Bioplásticos a partir de Amido de Batata**. 2009. Dissertação (mestrado em Química) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. São Paulo: Artmed Editora Ltda, 2014.
- OCDE. **Global Plastic Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. Paris: OCDE Publishing, 2022.
- RASMUSSEN, S. C. From parkesine to celluloid: The birth of organic plastics. **Angewandte Chemie**, 133(15), 8090-8094, 2021.
- RHEIN, S.; SCHMID, M. Consumers' awareness of plastic packaging: More than just environmental concerns. **Resources, Conservation and Recycling**, 162, 105063, 2020.
- RU, J. *et al.* Microbial degradation and valorization of plastic wastes. **Frontiers in Microbiology**, 11, 442, 2020.
- SADASIVUNI, K. K. *et al.* Flexible, biodegradable and recyclable solar cells: a review. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 30, 951-974, 2019.
- SALLEH K. M. *et al.* Biobased Materials: Types and Sources. In: INAMUDDIN; ALTALHI, T. **Handbook of Bioplastics and Bio composites Engineering Applications**. 2 ed. Hoboken: WILEY, 49-80, 2023.
- SARANTOPOULOS, C. I. G. L. *et al.* AS TENDÊNCIAS DE EMBALAGEM. **Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens**, 24(3), 69-85, 2020.
- SCHMID, M; MÜLLER, K. Whey Protein-Based Packaging Films and Coatings. In: DEETH, H. C.; N. BANSAL. **Whey Proteins: From Milk to Medicine**. Londres: Academic Press, 407-437, 2019.

- SHARMA, S. *et al.* Essential oils as additives in active food packaging. **Food chemistry**, 343, 128403, 2021.
- SINGH, N. B. *et al.* Bioplastic From Renewable Biomass. In: INAMUDDIN; ALTALHI, T. **Handbook of Bioplastics and Bio composites Engineering Applications**. 2 ed. Hoboken: WILEY, 23-48, 2023.
- SOHN, Y. J. *et al.* Recent advances in sustainable plastic upcycling and biopolymers. **Biotechnology Journal**, 15(6), 1900489, 2020.
- SÖYLEMEZ, M. A. *et al.* Biofibers and Their Composites for Industrial Applications. In: INAMUDDIN; ALTALHI, T. **Handbook of Bioplastics and Bio composites Engineering Applications**. 2 ed. Hoboken: WILEY, 513-538, 2023.
- TEOH, R. W. *et al.* Biocomposites in Active and Intelligent Food Packaging Applications. In: INAMUDDIN; ALTALHI, T. **Handbook of Bioplastics and Bio composites Engineering Applications**. 2 ed. Hoboken: WILEY, 317-360, 2023.
- THUSHARI, G. G. N.; SENEVIRATHNA, J. D. M. Plastic pollution in the marine environment. **Heliyon**, 6(8), e04709, 2020.
- TONG, X. Recent advances in natural polymer-based drug delivery systems. **Reactive and Functional Polymers**, 148, 104501, 2020.
- VAN EMMERICK, T.; SCHWARZ, A. Plastic debris in rivers. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, 7(1), e1398, 2019.
- WANG, C. Whey Protein Functional Properties and Applications in Food Formulation. In: GUO, M. **Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications**. Hoboken: Wiley, 157-204, 2019.
- WIJAYANT, H. B. *et al.* Thermal Denaturation, Aggregation, and Methods of Prevention. In: DEETH, H. C.; N. BANSAL. **Whey Proteins: From Milk to Medicine**. Londres: Academic Press, 185-247, 2019.