

MÉTODOS INOVADORES PARA ESTABILIZAÇÃO DE PIGMENTOS NATURAIS: REVISÃO DE LITERATURA

INNOVATIVE METHODS FOR STABILIZATION OF NATURAL PIGMENTS: LITERATURE REVIEW

DOI: 10.65747/conali2025v3c29

Brenda Hilary Avelino de Vasconcelos¹; Bruno José dos Santos²; Gabriela Tays da Silva Gonçalves³; Laura Lima Machado⁴; José do Egito de Paiva⁵; Erilane de Castro Lima Machado⁶

¹Estudante do Curso de mestrado na Pós-Graduação em Nutrição - PPGN - CCS – UFPE;

²Estudante do Curso de Nutrição - CAV - UFPE; ³Estudante do Curso de Nutrição - CAV - UFPE;

⁴Estudante do Curso de Medicina Veterinária– UNINASSAU; ⁵Docente/pesquisador do Depto. de Tecnologia Rural – UFRPE; ⁶ Docente/pesquisador do Núcleo de Nutrição – UFPE.

Contato: brenda.vasconcelos@ufpe.br

Resumo: A cor é a principal característica sensorial que leva à aceitação do alimento pelo consumidor. Alterações relacionadas à estabilidade dos pigmentos repercutem no sabor, segurança e valor nutricional. Para melhorar as propriedades de cor, a indústria alimentícia emprega corantes sintéticos e naturais. Embora os sintéticos se destaquem pela estabilidade e baixo custo, apresentam impactos adversos à saúde. A substituição por pigmentos naturais, contudo, ainda representa desafio técnico devido à instabilidade frente a fatores intrínsecos e extrínsecos. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão narrativa sobre a estabilidade de corantes naturais com viabilidade de uso na indústria de alimentos e o impacto de metodologias inovadoras para sua preservação, com ênfase em pigmentos da flora brasileira, preferencialmente do Nordeste. Foram consultadas as bases PubMed, Scielo e a plataforma CAFE da CAPES, utilizando diferentes descritores, sem restrição de idioma. Consideraram-se artigos publicados entre 2005 e 2025, além de dois anteriores (2002 e 2004), sendo encontrados 59 artigos para triagem e seleção. Identificaram-se estudos sobre vegetais e pigmentos com potencial de uso como corantes, especialmente antocianinas, carotenóides, betalainas e clorofilas. Contudo, trabalhos específicos com plantas do Nordeste ainda são escassos. Os principais fatores que afetam a estabilidade são exposição à luz, pH, oxigênio e interação com componentes da matriz alimentar. Entre os métodos de preservação destacam-se antioxidantes, liofilização, microencapsulação e nanotecnologia. Esta pesquisa reúne informações relevantes sobre pigmentos naturais e evidencia avanços no desenvolvimento de aditivos com dupla função, atuando como corantes e conservantes, além de potenciais efeitos sinérgicos.

Palavras-chave: antioxidantes naturais; corantes alimentícios; copigmentação; microencapsulação; nanotecnologia

Abstract: Color is the main sensory attribute that drives consumer acceptance of foods. Changes related to pigment stability affect flavor, safety, and nutritional value. To improve color properties, the food industry employs both synthetic and natural colorants. Although synthetic colorants stand out for their stability and low cost, they present long-term adverse health effects. The replacement of synthetic colorants with natural pigments, however, remains a technical challenge due to their intrinsic instability under environmental conditions. The aim of this study was to conduct a narrative review on the chemical stability of natural colorants with potential application in the food industry and on the impact of innovative methodologies for their preservation, with emphasis on pigments derived from Brazilian flora, particularly from the Northeast region. Articles were retrieved from PubMed, Scielo, and the CAPES CAFE platform using different descriptors, with no language restrictions. Publications between 2005 and 2025 were considered, in addition to two earlier studies (2002 and 2004), yielding 59 articles for screening and selection. Studies identified plant species and pigments with potential for use as food colorants, especially anthocyanins, carotenoids, betalains, and chlorophylls. However, specific research on plants from the Northeast remains scarce. The main

factors affecting pigment stability include exposure to light, pH, oxygen, and interactions with food matrix components. Preservation methods highlighted in the literature include antioxidants, freeze-drying, microencapsulation, and nanotechnology. This review provides relevant insights into natural pigments and highlights advances in the development of natural additives with dual functions, acting as both colorants and preservatives, in addition to potential synergistic effects.

Keywords: natural antioxidants; food coloring; copigmentation; microencapsulation; nanotechnology

INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro é uma região rica em biodiversidade vegetal, oferecendo diversas fontes de pigmentos naturais como clorofila, antocianinas, carotenóides e betalaínas. Tais compostos podem ser explorados como corantes alimentares naturais, alinhando-se à demanda por alimentos “*clean-label*” e saudáveis (1). Apesar desse potencial, a aplicação de corantes naturais ainda representa um desafio técnico, sobretudo pela instabilidade intrínseca desses compostos frente a variações de pH, calor e oxidação. No entanto, os benefícios funcionais associados a esses pigmentos, como propriedades anti-inflamatórias, imunomoduladoras e antioxidantes, justificam os avanços tecnológicos voltados à sua proteção e estabilização (2,3).

Entre os fatores que comprometem a qualidade e aceitação dos produtos, a oxidação e a degradação da cor são, sem dúvida, os mais desafiadores. Esses processos além de comprometerem o aspecto visual, um dos primeiros atributos percebidos pelo consumidor, também impactam negativamente o sabor, o aroma e o perfil nutricional (1). Assim, os antioxidantes naturais vêm ganhando relevância, por representarem uma alternativa alinhada às expectativas dos consumidores por alimentos mais naturais, livres de aditivos sintéticos e com benefícios adicionais à saúde.

Derivados de fontes vegetais como frutas, verduras, ervas e especiarias, possuem a capacidade de atuar como barreiras bioquímicas frente aos processos oxidativos, garantindo a preservação não apenas da cor, mas também da integridade dos alimentos (4). Nesse contexto, a estabilização de pigmentos naturais propõe diferentes benefícios para o alimento, consumidor e indústria, entre os quais a manutenção da cor vibrante e propriedades dos corantes mesmo após o processamento e armazenamento. Métodos inovadores como microencapsulação, nanotecnologia e o uso de antioxidantes oferecem soluções promissoras para proteger esses pigmentos contra fatores intrínsecos (inerentes ao alimento), e extrínsecos (ambientais), que podem degradá-los.

Apesar dos avanços tecnológicos, ainda há escassez de estudos sobre pigmentos de plantas nativas do Nordeste brasileiro e tecnologias adequadas para sua estabilização em escala industrial. Assim, esta revisão tem o objetivo de reunir evidências sobre a estabilização de pigmentos naturais da região Nordeste e demonstrar direcionamento da sua aplicação como corantes na indústria de alimentos.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado mediante desenvolvimento de uma revisão narrativa, com o objetivo de analisar métodos inovadores para a estabilização de pigmentos naturais com viabilidade de aplicação pela indústria de alimentos.

A busca de artigos científicos foi realizada entre os meses de julho à setembro de 2025, a partir do rastreio nas plataformas de busca: CAFE da CAPES e base de dados da PubMed e Scielo, usando-se os descritores “plantas regionais do nordeste”, “pigmentos naturais”, “corantes naturais em alimentos”, “estabilidade”, “estabilização”, “métodos inovadores”, “encapsulação”, “antioxidantes naturais” e “nanotecnologia”, sem restrição quanto ao idioma, e publicados no período entre 2005 e 2025, com exceção de dois artigos científicos, um do ano 2002 e outro de 2004, por suas relevâncias no tema em estudo.

Além de artigos originais, foram incluídos artigos de revisão recentes e materiais de referência atualizados, assim de fortalecer a base teórica-conceitual da temática. Após a identificação e seleção do material bibliográfico mediante leitura do resumo, realizou-se uma triagem de forma a priorizar a leitura completa daqueles que apresentavam relevância científica, inovação metodológica, aplicabilidade no setor alimentício e exploração de plantas da região nordeste do Brasil como fonte de pigmentos naturais. Por fim foram incluídos 52 artigos científicos.

Os artigos usados para o estudo abordam diferentes estratégias para estabilização de pigmentos naturais, de forma que foi possível destacar alguns subtemas para desenvolvimento de uma narrativa no tema de interesse:

- Pigmentos naturais e sintéticos em alimentos processados: Vantagens e limitações de uso;
- Pigmentos naturais de plantas da flora brasileira e estabilidade para uso como corantes naturais em alimentos
- Antioxidantes naturais no controle da oxidação e da estabilidade de pigmentos naturais em alimentos;
- Microencapsulação de pigmentos naturais: Proteção às condições adversas *in vitro* e na matriz alimentar
- Nanotecnologia aplicada à preservação de pigmentos: Aspectos da estabilidade

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 52 artigos incluídos nessa revisão forneceram o embasamento necessário para nortear a discussão e apresentação dos resultados.

O material selecionado foi utilizado para ressaltar a importância dos pigmentos naturais, apresentar as soluções mais promissoras e tecnicamente viáveis para sua preservação. O foco central é a aplicação desses compostos pela indústria de alimentos de maneira sustentável e funcional. Os resultados foram estruturados em tópicos afim de favorecer a compreensão do leitor sobre o tema desta pesquisa.

A) PIGMENTOS NATURAIS E SINTÉTICOS EM ALIMENTOS PROCESSADOS: VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE USO

A utilização de corantes em alimentos tem como principal finalidade intensificar ou restaurar a coloração natural dos produtos, influenciando diretamente na aceitabilidade sensorial pelos consumidores (5). Tradicionalmente, os corantes sintéticos têm sido amplamente utilizados pela indústria alimentícia devido à sua elevada estabilidade físico-química, baixo custo de produção e facilidade de aplicação em diferentes matrizes alimentares. Entretanto, diversas evidências científicas vêm associando o consumo frequente de corantes artificiais a potenciais efeitos adversos à saúde, como reações alérgicas, distúrbios comportamentais e desequilíbrios metabólicos, o que tem incentivado a busca por substitutos naturais mais seguros (3).

Nesse contexto, os pigmentos naturais vêm ganhando destaque na indústria de alimentos como alternativa aos corantes sintéticos, baseado na percepção de maior segurança e qualidade (5). Esses pigmentos são extraídos de fontes vegetais, fúngicas ou microbianas, como frutas, raízes, flores, folhas, microalgas e bactérias. As principais classes de pigmentos incluem antocianinas, betalaínas, carotenóides, clorofilas e curcuminóides, que além de promoverem coloração ao alimento, possuem como vantagem o pronunciado potencial biológico decorrente das propriedades bioativas, como atividade antioxidante, anti-inflamatória, imunomoduladora e potencial antiproliferativo (3,6).

A multifuncionalidade associada a esses compostos, somado ao apelo de saudabilidade, conferem vantagens importantes dos pigmentos naturais em comparação aos sintéticos (7). No entanto, a aplicabilidade em matriz alimentar enfrenta limitações, principalmente devido a estabilidade, que pode ser comprometida por fatores ambientais como luz, oxigênio, variações de pH e temperaturas elevadas. Essas condições podem provocar degradação, alteração de cor ou perda da atividade funcional (8). Tais características impõem desafios para a formulação de alimentos industrializados com vida útil prolongada, exigindo o desenvolvimento de estratégias tecnológicas para a proteção e estabilização desses pigmentos durante o processamento e armazenamento (5).

Na indústria de ingredientes, tecnologias como a secagem por aspersão (*spray drying*) têm sido utilizadas com sucesso para estabilizar pigmentos naturais, como a astaxantina extraída da microalga *Haematococcus pluvialis*. Mesmo após o processamento térmico, os extratos

demonstraram atividade antioxidante significativa, o que evidencia o potencial desses pigmentos em formulações funcionais, mesmo sob condições adversas (6).

A substituição completa de corantes sintéticos por pigmentos naturais ainda encontra barreiras industriais relacionadas à padronização de cor, custo, estabilidade e compatibilidade com os processos tecnológicos existentes. Apesar disso, a crescente demanda por alimentos mais naturais e com menor adição de aditivos artificiais tem impulsionado a indústria a investir em pesquisas voltadas ao aprimoramento da estabilidade, viabilidade econômica e segurança dos pigmentos naturais (3,8).

Além das vantagens e desvantagens de corantes naturais e artificiais, abordou-se em uma revisão bibliográfica abrangente os tipos de corantes mais empregados pelas indústrias alimentícias, de forma que as antocianinas, o urucum, o carmin de cochonilha, a curcumina e as betalaínas mereceram destaque em razão da substituição gradual dos corantes artificiais pelos naturais devido ao amplo espectro de cores, alto poder tintorial, estabilidade frente a processos industriais, aceitação consolidada e maior disponibilidade comercial (9).

Aditivos naturais para uso na conservação do alimento possuem limitações por questões de estabilidade, sustentabilidade e custo-benefício, o que justifica a necessidade de soluções inovadoras. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos aditivos naturais, seguros e eficientes podem ser alcançados através da aplicação de compostos com dupla funcionalidade (atividade de pigmento e propriedade conservante), ou através do uso combinado de substâncias visando o efeito sinérgico (10).

B) PIGMENTOS NATURAIS DE PLANTAS DA FLORA BRASILEIRA E ESTABILIDADE PARA USO COMO CORANTES NATURAIS EM ALIMENTOS

Pigmentos como antocianinas, carotenóides, betalaínas e clorofilas, amplamente presentes em espécies como açaí, beterraba, açafrão-da-terra (*Curcuma longa*) e microalgas, têm demonstrado não apenas capacidade de conferir coloração aos alimentos, mas também propriedades funcionais relevantes, como atividade antioxidante e estabilidade oxidativa em diferentes matrizes (3,11). De maneira geral, a aplicação industrial dos pigmentos naturais tem ampla limitação. Assim, a indústria tem investido em estratégias para aumentar a estabilidade desses compostos frente ao processamento, armazenamento e exposição à luz (11).

Entre os achados do Nordeste brasileiro, destaca-se o umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.), fruto típico do semiárido nordestino, com pigmentos naturais que conferem coloração característica a doces e polpas (18). Em estudos com doce em massa de umbu, verificou-se que a intensidade de cor é influenciada por variações na temperatura (33 e 43°C) e tipo de embalagem (polipropileno e celofane) por 90 dias de armazenamento; de forma que para assegurar coloração mais estável ao produto final é necessário controlar esses fatores. Os autores relataram que embalagens de

polipropileno e estocagem à temperaturas mais baixas foram as condições mais adequadas para preservação da cor (18).

Diversos estudos demonstram estratégias de controle para conservação da cor e propriedades bioativas. O controle de condições de armazenamento sob temperaturas moderadas (~25 °C), embalagens de baixa permeabilidade à luz e oxigênio, e em meio a pH adequado são fatores que favorecem a conservação da cor (13). Dentre os principais fatores determinantes para estabilização, destacam-se:

- 1) pH: É um dos fatores determinantes para estabilização, de forma que antocianinas são mais estáveis em meios ácidos (~pH 1–3,5), mantendo tonalidade vermelha/flavylium (27); enquanto betalaínas mostram estabilidade melhor em pH neutro (28); e os carotenóides como bixina são menos sensíveis a variações de pH, mas muito sensíveis à oxidação (14).
- 2) Temperatura e luz: Altas temperaturas e exposição à luz aceleram a degradação de antocianinas e betalaínas, no entanto no caso da *Clitoria ternatea*, a luz provocou perda parcial, mas a estrutura acilada das moléculas proporcionou maior resistência (25); assim como para os carotenóides, embora o urucum seja relativamente estável o aquecimento pode converter a bixina em formas mais estáveis, desde que haja proteção contra oxidação (14,15). Em um estudo com a microalga *Chlorella vulgaris*, rica em clorofila, observou-se que a estabilidade do pigmento isolado foi altamente dependente das condições ambientais, especialmente temperatura e exposição à luz. A manutenção da cor verde foi mais efetiva quando o pigmento foi armazenado em temperaturas abaixo de 28 °C e em condições de ausência de luz. Essas informações são fundamentais para viabilizar o uso de pigmentos clorofílicos em alimentos prontos para consumo, como arroz preparado para sushi, onde a cor permaneceu estável por até três dias sob refrigeração (8).
- 3) Oxigênio e atividade de água: A presença de O₂ e alta umidade aceleram a oxidação dos pigmentos, especialmente carotenóides e antocianinas (29).
- 4) Matriz alimentar: Interações com proteínas e açúcares podem afetar a estabilidade da cor sobretudo em derivados lácteos durante o aquecimento e adicionados de antocianinas e betalaínas (11,21).

Carotenoides: A cor de um alimento carotenogênico depende do tipo de carotenóide presente, sua concentração e seu estado físico. Alimentos podem ser amarelos, como o milho (luteína e zeaxantina), laranja, como frutas cítricas (β -criptoxantina), ou vermelhos, como o tomate (licopeno) (16). O Brasil possui uma variedade notável de alimentos ricos nesses compostos, incluindo β -caroteno, α -caroteno, β -criptoxantina, luteína, licopeno e violaxantina, sendo os três primeiros precursores de vitamina A. Entre os alimentos mais ricos em β -caroteno destacam-se buriti, tucumã, acerola e manga, enquanto a β -criptoxantina predomina em frutas de polpa laranja, como cajá, mamão, laranja e pêssigo. A luteína é abundante em verduras folhosas e outros vegetais verdes, e o licopeno encontra-se principalmente no tomate, melancia, goiaba vermelha, mamão vermelho e pitanga (16).

Entre os carotenoides de destaque, o urucum (*Bixa orellana* L.) é amplamente usado no Brasil como fonte de bixina, um carotenoide lipossolúvel intensamente vermelho-alaranjado, e comparavelmente mais estável que outras fontes vegetais quando protegido da oxidação, luz e calor (13). Ainda, pode se converter em formas mais estáveis (trans-bixina) durante o aquecimento; enquanto a norbixina, hidrossolúvel, representa cerca de 80 % do consumo e é a mais usada na indústria láctea, com maior estabilidade quando protegida de oxidação e luz (14,15).

Outro carotenoide relevante é a astaxantina, obtida da microalga *Haematococcus pluvialis*, destaca-se pela elevada atividade antioxidante. Sua estabilidade pode ser mantida mesmo após o processamento por secagem por *spray drying*, desde que respeitadas as condições ideais de temperatura e concentração de adjuvantes de tecnologia. Contudo, reduções no teor de carotenoides têm sido associada ao uso de temperaturas elevadas durante a secagem, o que ressalta a necessidade de padronização desses processos para garantir as propriedades bioativas do pigmento (6).

A oxidação, principal causa de degradação dos carotenóides, depende da disponibilidade de oxigênio, do tipo de carotenóide e do seu estado físico, sendo estimulada por luz, calor, metais, enzimas oxidativas e peróxidos, e inibida por antioxidantes. A luz, em especial, acelera a degradação em sistemas-modelo de baixa umidade (amido de milho, fécula de batata e celulose cristalina), em sistemas aquosos e em alimentos liofilizados. As taxas de degradação e os fatores que as influenciam são considerados pela indústria alimentícia para preservar a cor e as atividades biológicas dos carotenóides durante processamento e armazenamento, evitando perda de aceitabilidade e valor nutricional (17).

Antocianinas: Em virtude de efeitos adversos para a saúde de corantes sintéticos como o E129 (*Allura Red*), um corante vermelho, solúvel em água, usado em alimentos para conferir uma cor vermelha intensa e estável; produtores de alimentos buscam usar antocianinas como substitutos (22). As antocianinas são o grupo de pigmentos hidrossolúveis mais abrangentes nas plantas, apresentam um elevado potencial como corantes naturais devido à fácil incorporação em meios aquosos. São responsáveis pelas cores laranja, magenta, azul, violeta e vermelha em diversas partes das plantas — especialmente em frutas e flores; e têm atraído a atenção como corantes naturais para uso em iogurtes, sucos, geleias e produtos de panificação. No entanto a aplicabilidade prática das antocianinas é limitada devido à sua baixa estabilidade sob a influência de vários fatores: pH, temperatura de armazenamento, presença de enzimas, estrutura química, luz, oxigênio, solventes e presença de outros compostos (19–21).

O mirtilo (*Vaccinium* sp.) é considerado uma das frutas mais ricas em compostos fenólicos, sobretudo antocianinas, que conferem sua cor característica e estão diretamente associadas à elevada capacidade antioxidante do fruto. Esses pigmentos, localizados principalmente na casca, apresentam potencial não apenas como corantes naturais, em substituição aos sintéticos que vêm

sendo cada vez mais restringidos devido a riscos toxicológicos, mas também como compostos bioativos capazes de reduzir os efeitos do estresse oxidativo no organismo humano (20). Nesse sentido, torna-se essencial o avanço em pesquisas voltadas à extração e estabilização das antocianinas, reduzindo perdas durante o processamento e aumentando a viabilidade de uso desses pigmentos pela indústria alimentícia. Assim, o mirtilo destaca-se não apenas pelo apelo sensorial e nutricional, mas também como um aliado estratégico no desenvolvimento de alimentos funcionais e na valorização da cadeia produtiva de frutas no Brasil (23).

Estudando as antocianinas do açaí, fruto tropical típico do Brasil, os autores relatam que apresentam alta sensibilidade a fatores ambientais, sofrendo degradação principalmente em condições de pH elevado, temperaturas elevadas, exposição à luz e presença de oxigênio. Observaram que a estabilidade dessas moléculas é maior em meios ácidos e em condições controladas de armazenamento, o que reforça a necessidade de tecnologias que minimizem perdas durante o processamento industrial. Além disso, o açaí se destaca como uma das fontes mais ricas em antocianinas, oferecendo grande potencial como corante natural e como composto funcional de interesse para a saúde, reforçando a relevância do desenvolvimento de estratégias que garantam maior conservação da cor e da bioatividade das antocianinas em produtos derivados do fruto (21).

Em achados recentes, divulgam-se pigmentos de plantas da mata atlântica costeira como grumixama (*Eugenia brasiliensis* Lam.), riquíssimas em antocianinas como cianidina 3-glicosídeo e delphinidina 3-glicosídeo, com potencial como corantes funcionais naturais (24). Em produtos ácidos, como iogurtes ou bebidas à base de frutas nordestinas, antocianinas de grumixama ou outras frutíferas tropicais regionais podem ser aplicadas com boa estabilidade em pH ácido (13). Entre outros estudos, destaca-se que a *Clitoria ternatea* (índigo-azul) apresentou boa estabilidade de antocianinas, inclusive sob exposição à luz (~25 °C) por cinco semanas, com meia-vida elevada em pH ≈ 5, possibilitando tons azulados estáveis (25). Em frutas vermelhas, repolho roxo e beterraba, observou-se que a estabilidade de antocianinas é favorecida por pH ácido (1,0–3,5). Estratégias como microencapsulamento com maltodextrina por *spray-drying* aumentam a proteção e a estabilidade durante o processamento (11).

Um estudo avaliou extratos de frutas ricas em antocianinas (Casca de berinjela (*Solanum melongena*), Casca de Ameixa fresca (*Prunus salicina*), Jamelão (*Syzygium cumini*), Morango (*Fragaria vesca*), Casca de Uva roxa (*Vitis vinifera*) e Repolho roxo (*Brassica oleracea rubra*) cujas colorações ficavam entre roxo e vermelho para uso como corante para elaboração de bala de gelatina. Os autores verificaram que a bala de gelatina saborizada com frutas como o jamelão e a uva precisa ser mais exploradas cientificamente quanto ao seu uso como corante, pois foram as espécies que conferiram os melhores resultados (26).

Entre os fatores adversos, as antocianinas são mais suscetíveis a degradação pelo calor, sobre o que um recente estudo revelou que as altas temperaturas, 60 C° por 2 semanas, e os longos

períodos de armazenamento, 150 dias, afetam o teor de antocianinas nos extratos brutos e que ocorre uma degradação muito rápida sob temperatura elevada. Enquanto que durante o armazenamento à temperatura ambiente e protegidos da luz, as antocianinas apresentaram melhor estabilidade, sofrendo degradação mais rápida quando os extratos dos frutos (mirtilo - *Vaccinium myrtillus* L., amoras - *Morus nigra* L., *Rubus fruticosus* L.) foram tratados com 1% de ácido ascórbico (20).

C) ANTIOXIDANTES NATURAIS NO CONTROLE DA OXIDAÇÃO E DA ESTABILIDADE DE PIGMENTOS NATURAIS EM ALIMENTOS

Neste tópico se discorre sobre os principais tipos de antioxidantes naturais, seus mecanismos de ação, aplicações práticas, desafios e perspectivas futuras na indústria de alimentos. O universo dos antioxidantes naturais é amplo e diversificado, refletindo a rica variedade de compostos bioativos produzidos pelas plantas, e são classificados não apenas por sua origem, mas também por suas propriedades químicas e funções biológicas.

Os antioxidantes naturais têm sido amplamente investigados pela indústria de alimentos, não apenas pela capacidade de retardar a oxidação lipídica, mas principalmente pelo papel protetor na preservação da cor e da estabilidade de pigmentos. A degradação desses compostos está diretamente relacionada à perda de tonalidade e ao comprometimento da qualidade sensorial, sendo a ação antioxidante um recurso tecnológico essencial para prolongar a vida útil e manter a atratividade dos alimentos (28).

Entre os principais antioxidantes usados pela indústria de alimentos, destacam-se neste estudo os seguintes:

1) Tocoferóis: Pertencem à família da vitamina E, são antioxidantes lipossolúveis amplamente distribuídos na natureza, particularmente em nozes, sementes, óleos vegetais e folhas verdes. Sua principal função nos alimentos é proteger os lipídios da oxidação, evitando, por exemplo, o desenvolvimento de rancidez em produtos ricos em gorduras. Entre as diferentes formas de tocoferol, o alfa-tocoferol é a mais prevalente e biologicamente ativa na dieta humana, contribuindo não apenas para a estabilidade dos alimentos, mas também para a saúde cardiovascular e o fortalecimento do sistema imunológico (31,32). Ressalta-se que os tocoferóis são relevantes na proteção de carotenoides, como bixina e licopeno, retardando a oxidação em matrizes lipídicas e mantendo a cor característica de óleos e produtos gordurosos (33).

2) Ácido ascórbico: É um antioxidante hidrossolúvel de destacada importância tanto nutricional quanto tecnológica. Além de ser abundante em frutas cítricas, ele é comumente adicionado a diversos produtos alimentícios para prevenir a descoloração, sobretudo em frutas e vegetais frescos. Sua ação como agente redutor o torna especialmente eficaz em neutralizar espécies

reativas de oxigênio e na prevenção da oxidação de pigmentos naturais sensíveis, como as antocianinas (34,35). Salienta-se que o ácido ascórbico (vitamina C) é um dos antioxidantes naturais mais utilizados para prevenir a descoloração em frutas e vegetais, atuando de forma eficaz na proteção de antocianinas e betalaínas. Em bebidas à base de frutas, sua aplicação demonstrou reduzir significativamente a perda de tonalidade durante o armazenamento (36).

3) Carotenóides: Formam um grupo de pigmentos naturais responsáveis pelas cores vibrantes que vão do amarelo ao vermelho em vegetais como cenouras, tomates e pimentões. Além do efeito estético, possuem potente atividade antioxidante, agindo na proteção contra o dano oxidativo tanto em sistemas alimentares quanto no organismo humano. Compostos como o beta-caroteno, licopeno e luteína não só preservam a aparência dos alimentos, mas também estão associados à prevenção de doenças crônicas, como certos tipos de câncer e degeneração macular relacionada à idade (37).

4) Polifenóis: Representam um vasto grupo de compostos fenólicos encontrados em frutas, verduras, chás, vinhos e especiarias. Sua capacidade antioxidante é atribuída à habilidade de doar hidrogênios ou elétrons para neutralizar radicais livres. Além do efeito protetor sobre os alimentos, diversos estudos associam os polifenóis a efeitos cardioprotetores, anticarcinogênicos e neuroprotetores, embora sua biodisponibilidade possa variar consideravelmente após a digestão (38). Ainda, os polifenóis presentes em extratos vegetais como alecrim, chá-verde e uva exercem efeito protetor sobre pigmentos em alimentos processados, mantendo a intensidade da cor em carnes e produtos defumados (39). Além disso, os próprios carotenoides com atividade antioxidante (como β -caroteno e luteína) contribuem não apenas como pigmentos, mas também como protetores de outros corantes contra a degradação oxidativa (40).

Dito os principais compostos utilizados na indústria, é essencial compreender os mecanismos de ação pelos quais os antioxidantes exercem sua função protetora. Entre os principais caminhos, atuam impedindo ou retardando a formação e propagação de radicais livres. Um dos mecanismos mais conhecidos é a neutralização direta de radicais livres, interrompendo o ciclo oxidativo antes que ele comprometa os constituintes essenciais dos alimentos, como lipídios, proteínas e pigmentos (41,42). Além disso, nutrientes antioxidantes, como as vitaminas A, C e E, juntamente com minerais como cobre, zinco e selênio, desempenham papel complementar ao reforçar as defesas antioxidantes naturais do organismo e dos alimentos (38).

Outro mecanismo relevante é a inibição de enzimas pró-oxidantes, como as polifenoloxidasas, cuja atividade está diretamente associada ao escurecimento enzimático em frutas e vegetais. Compostos como o ácido ascórbico e o ácido cítrico são capazes de modular essa atividade, prevenindo alterações de cor indesejadas resultantes não apenas de escurecimento enzimático, mas também do não enzimático (10,43). Segundo Fan, Zhao e Li (2023) (43) o ácido cítrico e o ácido L-ascórbico são adequados para a proteção da cor da farinha de abóbora sujeita a uma severa reação de Maillard e oxidação de carotenoides durante o processamento de extrusão

a alta temperatura, o que afeta seriamente o aspecto do produto.

Ainda, atuam como quelantes de metais pró-oxidantes, como ferro e cobre, que podem catalisar reações oxidativas. Efeitos sinérgicos também são observados quando diferentes extratos vegetais são combinados, potencializando a ação antioxidante e oferecendo uma proteção mais robusta aos alimentos, a exemplo da associação entre ácido ascórbico e polifenóis (30,39,44).

A aplicação de antioxidantes naturais no setor de alimentos é ampla e estratégica, especialmente em produtos suscetíveis à oxidação, como carnes, óleos, laticínios e produtos de panificação. Desta forma, antioxidantes naturais são empregados para preservar a estabilidade cromática em diferentes matrizes alimentares. Em sucos e bebidas pigmentadas por antocianinas, o ácido ascórbico auxilia na redução da perda de intensidade visual (45). Em produtos cárneos, extratos vegetais ricos em polifenóis protegem a coloração característica frente à oxidação lipídica, preservando tanto o sabor quanto a coloração característica (44). Em óleos e margarinas enriquecidas com carotenóides, os tocoferóis evitam o clareamento (46). Já em derivados lácteos com adição de pigmentos naturais, ajustes de pH e adição de antioxidantes favorecem maior retenção da cor (30).

O desafio atual está em alinhar a eficácia antioxidante à manutenção da cor em matrizes alimentares diversas, considerando que cada pigmento apresenta sensibilidade distinta a fatores ambientais. Perspectivas recentes apontam para o desenvolvimento de combinações antioxidantes específicas para determinados grupos de pigmentos, bem como para a integração dessas substâncias a sistemas de microencapsulação e nanotecnologia, ampliando sua eficácia e prolongando a estabilidade visual (47,48). Assim, o uso de antioxidantes naturais configura-se como estratégia central para a preservação da cor e do apelo visual dos alimentos, agregando valor sensorial e comercial aos produtos pigmentados (30).

D) MICROENCAPSULAÇÃO DE PIGMENTOS NATURAIS: PROTEÇÃO ÀS CONDIÇÕES ADVERSAS EM ESTUDOS *IN VITRO* E NA MATRIX ALIMENTAR

Diante desse desafio, a microencapsulação surge como uma estratégia tecnológica eficaz para proteger esses compostos durante o processamento, armazenamento e comercialização (49). A microencapsulação consiste em envolver o pigmento com materiais encapsulantes, formando pequenas cápsulas que atuam como barreira protetora com o objetivo de isolar o ativo das condições adversas. Entre os materiais mais utilizados encontram-se a maltodextrina, goma-arábica, alginato de sódio, beta-ciclodextrina, e proteínas. A escolha do encapsulante influencia diretamente a eficiência da proteção e a estabilidade do pigmento encapsulado (50,51).

Diferentes processos podem ser empregados para microencapsulação, como o *spray drying*, lipossomas, técnicas de coacervação ou baseados em emulsões, constituindo-se em microcápsulas, microesferas ou micropartículas, dependendo da técnica utilizada. Essa tecnologia

é capaz de proporcionar estabilidade aos corantes naturais e adicionalmente proporcionar uma liberação controlada durante o armazenamento porque o aprisionamento dos pigmentos naturais em um núcleo protegido evita a degradação por fatores ambientais (52). Algumas vantagens que a microencapsulação de corantes naturais proporciona são: soluções com coloração mais intensa (estabilidade colorimétrica), aumento na solubilidade de compostos lipossolúveis, preservação de compostos antioxidantes e compostos bioativos, estabilidade térmica, e melhor estabilidade durante o armazenamento exposto à luz em relação ao extrato bruto (53,54).

Estudos envolvendo a bixina, pigmento extraído da fração lipossolúvel do urucum, a técnica de *spray drying* demonstrou ser eficaz para aumentar sua estabilidade. Os autores relatam que formulações onde se combinou goma-arábica e maltodextrina apresentaram desempenho superior, enquanto a beta-ciclodextrina também se destacou na manutenção da estabilidade, embora com custo mais elevado, de forma que os produtos microencapsulados mostraram-se mais estáveis que o pigmento sem microencapsulação (50). Empregando-se goma arábica, goma de cajueiro ou maltodextrina, verificou-se estabilidade deste pigmento frente à luz, umidade e exposição ao oxigênio (13).

Ainda, estes estudos demonstram que a microencapsulação aumenta significativamente a estabilidade do pigmento de urucum em comparação à forma livre, embora com diferenças na influência do método de secagem e o material de parede utilizado na proteção do pigmento. Constant et al. (2021) (50) evidenciaram que a mistura de goma-arábica e maltodextrina conferiu maior proteção ao pigmento, enquanto a beta-ciclodextrina formou complexos altamente estáveis frente à luz, ainda que limitados pela baixa solubilidade. Enquanto Mendes (2012) (55) destacou que a goma-arábica foi mais eficiente quando comparada a goma do cajueiro, e que o processo de liofilização preservou melhor a bixina em relação ao *spray drying*. Assim, enquanto o primeiro estudo aponta a superioridade de combinações de encapsulantes tradicionais e ciclodextrinas, o segundo amplia a discussão sobre a aplicação de biopolímeros alternativos na encapsulação de urucum.

Em relação às antocianinas de mirtilo, sistemas baseados em microcápsulas e lipossomas também se mostraram capazes de proteger o pigmento contra luz e altas temperaturas, mantendo a estabilidade estrutural com taxas de encapsulamento de até 96,14% em microcápsulas e 81,26% em lipossomas. Nesse contexto, o alginato de sódio se mostrou um dos encapsulantes mais eficientes, permitindo o controle de tamanho de partículas e propriedades de superfície, fatores que interferem diretamente na preservação do pigmento (51).

Visando contornar as limitações de aplicações das antocianinas, usou-se polietilenoglicol (PEG) e quitosana como materiais de parede e antocianina purificada de bagaço de amoreira (*Morus alba* L.) como materiais de núcleo para preparar um complexo de antocianina encapsulado em PEG e quitosana. O melhor processo, que foi otimizado com metodologia de superfície de resposta, usou uma razão de massa de 20:1 de PEG4000 para quitosana e uma razão de 1:3,8 de

materiais de núcleo para parede. Ao determinar regularmente o conteúdo total de antocianina dos complexos de antocianina encapsulados em diferentes temperaturas por um ano, verificam-se pequenas mudanças, de forma que na temperatura mais alta (35 °C), o conteúdo total de antocianina foi reduzido em apenas $3,11 \pm 0,61\%$ e sem diferença significativa. Assim, os autores informam que a estabilidade da antocianina foi significativamente aumentada após o encapsulamento (56).

Em processos através da emulsificação, avaliou-se a encapsulação de oleorresina derivado da cúrcuma (*Curcuma longa* L.) e responsável pela cor amarelo alaranjado do produto. Nesse sistema, em que se verificou os efeitos de duas posições do pigmento durante o encapsulamento, na fase oleosa interna e na camada externa das partículas sólidas, observou-se a influência desta posição no resultado de forma que os pigmentos posicionados na camada externa da partícula resultou em maior estabilidade da intensidade da cor, com maior resistência às condições do processamento do alimento (49).

A clorofila é um pigmento natural que confere a cor verde altamente desejável na indústria alimentícia (57). No entanto, as fontes naturais de clorofilas são instáveis na utilização como pigmento devido a sua rápida degradação, resultando na formação de derivados como feofitina, feoforbídeo, pirofeofitina e pirofeoforbídeo, o que leva a perda da cor verde, transformando-a em marrom-oliva (58). Nesse sentido, a microencapsulação é uma tecnologia promissora para mitigar esse problema na instabilidade. Contudo, a escolha do material de parede e a pré-estabilização da clorofila são cruciais para o sucesso da preservação da cor. Para aumentar a estabilidade da molécula de clorofila antes da encapsulação, o íon magnésio em seu anel de porfirina pode ser substituído por cátions divalentes, como zinco (Zn) ou cobre (Cu). Isso forma derivados de clorofila metálica (metal-chlorophyll complexes), que são mais estáveis ao ácido e ao calor e agem como antioxidantes mais eficazes (59).

A secagem por spray drying (atomização) é a técnica mais amplamente empregada para a microencapsulação de corantes naturais na indústria alimentícia, incluindo a clorofila. Porrarud e Pranee (2010) (59) investigaram a encapsulação de derivados de Zn-clorofila extraídos de folhas de *Pandanus amaryllifolius* por secagem por atomização, utilizando diferentes materiais de parede, como goma arábica, maltodextrina e amido modificado por OSA (octenil succinato). Os autores observaram que a formulação com 30% de amido modificado por OSA resultou nos maiores valores de esverdeamento ($a^* = -14,64$), maior teor total de clorofila (187,34 mg/100 g), além de maior estabilidade de armazenamento, uma vez que o pó de Zn-clorofila encapsulado com OSA apresentou meia-vida de 462 dias, superando as formulações com goma arábica (330 dias) e maltodextrina (385 dias).

Colaborando com esses dados, Mahae, Pichairat e Chankaew (2025) (58) avaliaram a encapsulação de complexos metálicos de clorofila obtidos da alga *Chara corallina*, também pelo

método de spray drying, utilizando goma arábica e maltodextrina como agentes encapsulantes. Nesse caso, a maltodextrina apresentou melhor desempenho em relação à preservação da cor e do teor de pigmentos, resultando nos maiores valores de esverdeamento ($a^* = -14,05$) e na maior concentração total de clorofila (20,78 $\mu\text{g/g}$).

Diante do exposto, a microencapsulação de pigmentos naturais se destaca como uma ferramenta tecnológica promissora para a indústria de alimentos, possibilitando a proteção desses compostos frente a fatores ambientais. A escolha adequada do material encapsulante e do método de produção é essencial para garantir eficiência do processo e ampliar as possibilidades de uso de pigmentos naturais em diferentes matrizes alimentares (49,50).

E) NANOTECNOLOGIA APLICADA À PRESERVAÇÃO DE PIGMENTOS: ASPECTOS DA ESTABILIDADE

A nanotecnologia oferece soluções promissoras para a conservação de pigmentos naturais, como os carotenoides, antocianinas, e clorofilas, por meio de sistemas de encapsulação. Esses nanosistemas, além de favorecerem a estabilidade dos compostos no meio de interesse, criam uma barreira protetora que reduz a degradação por fatores externos principalmente luz e oxidação, além da resistência térmica, e questões envolvendo interações com componentes da matriz alimentar mantendo a integridade dos pigmentos durante o processamento e biodisponibilidade (60–63).

A nanotecnologia pode ser uma técnica promissora para os carotenoides, associados a um problema de baixa estabilidade e solubilidade devido a hidrofobicidade frente aos diversos processos na indústria de alimentos, uma vez que esta técnica pode proporcionar a esses compostos estabilidade e solubilidade em meio aquoso. Técnicas de nanoencapsulamento para o β -caroteno e outros carotenóides se constituem em técnicas como: nanoencapsulamento por nanopartículas de lipídios, por fluidos supercríticos e por micelas de caseína por autojunção (62).

Quanto as antocianinas (ACNs), avaliou-se estes pigmentos através da encapsulação em nanocomplexos com cloridrato de quitosana (CHC), carboximetil quitosana (CMC) e isolado proteico de soro de leite (WPI). Os autores relatam que os nanocomplexos CHC/CMC-WPI carregados com ACN (ACN-CHC/CMC-WPI) apresentaram tamanho de partícula preferencial (332,20 nm) e potencial zeta (+23,65 mV) e alta eficiência de encapsulamento (60,70%). E ainda que, os nanocomplexos ACN-CHC/CMC-WPI exibiram formato esférico suave por microscopia eletrônica de transmissão. Os nanocomplexos, inclusive quando incorporados à bebida de café, protegeram melhor as ACNs em altas temperaturas em comparação com as ACNs não encapsuladas. O estudo sugere que os nanocomplexos de CHC/CMC-WPI podem aumentar a estabilidade térmica e retardar a liberação de ACNs em produtos alimentícios (63).

Além disso, outros autores relatam que nanoemulsões de clorofila extraída de folhas de *Citrus grandis*, popularmente conhecido como pomelo, mantiveram estabilidade térmica e coloração

intacta ao longo de 90 dias a 4 °C, mesmo em condições adversas de armazenamento e pH (61). Recentes achados sobre antocianinas destacam que técnicas de nanoencapsulação utilizando lipídeos, polissacarídeos e proteínas proporcionam proteção eficiente contra degradação oxidativa e fotodegradação, além de melhorar a biodisponibilidade (60).

Essas evidências reforçam o potencial dos sistemas nanotecnológicos em preservar compostos sensíveis como antocianinas, carotenóides, e clorofilas, aprimorando a estabilidade funcional e sensorial em aplicações industriais.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de antioxidantes naturais configura-se como uma estratégia promissora para preservar a qualidade e coloração dos alimentos. Apesar das barreiras industriais relacionadas à padronização de cor, custo, estabilidade e compatibilidade com os processos tecnológicos existentes, os pigmentos naturais como antocianinas, carotenóides, tabalaínas e clorofilas demonstram potencial antioxidante significativo, podendo ser preservado por técnicas de nanotecnologia e/ou combinações sinérgicas, emergindo como alternativa estratégica.

O cenário futuro aponta para um avanço na otimização dos métodos de extração, purificação e estabilização aliado ao aproveitamento de resíduos agroindustriais, tende a consolidar uma tendência clara de valorização dos produtos com rótulos limpos, estimulando a substituição de corantes e conservantes artificiais por alternativas naturais.

REFERÊNCIAS

1. Guarnieri CAP. Avaliação da estabilidade química de corantes naturais utilizados na indústria de alimentos: uma revisão. (Florianópolis): UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; 2023.
2. Matiucci MA, Rocha JDM, Chambó APS, Alves LF de S, Silva AA, Oliveira GG, et al. Ação antioxidante de pigmentos naturais em filés de tilápia do Nilo defumados. *Research, Society and Development* (Internet). 2021 Oct 5 (cited 2025 Aug 31);10(13):e79101320464–e79101320464. Available from: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/20464>
3. Filipini LK, Quichini LP, Wons MCB, Barbieri M, Silva P da C da. Corantes naturais: usos, benefícios e métodos de extração (Internet). 2022 (cited 2025 Aug 31). Available from: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2664>

4. Pateiro M, Gómez-Salazar JA, Jaime-Patlán M, Sosa-Morales ME, Lorenzo JM. Plant Extracts Obtained with Green Solvents as Natural Antioxidants in Fresh Meat Products. *Antioxidants* 2021, Vol 10, Page 181 (Internet). 2021 Jan 27 (cited 2025 Aug 31);10(2):181. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3921/10/2/181/htm>
5. Lara KPS, Flores JGP, López EC, Vega KS, Curiel LG, Escalante EP, et al. Exploración Integral de los Colorantes Naturales en la Industria Alimentaria: Desafíos y Oportunidades. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 2024 Jun 25;8(3):4586–614.
6. Loch-Neckel G, Schütz FE, Derner RB, Lemos-Senna E. Obtenção de extratos secos de carotenoides a partir da biomassa da microalga *Haematococcus pluvialis* por secagem em torre de aspersão (spray-drying). *Matéria (Rio de Janeiro)* (Internet). 2018 (cited 2025 Aug 31);23(4):e12221. Available from: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BVGGHmFYnfWQ3SVKShPD5Mn/abstract/?lang=pt>
7. Jurić S, Jurić M, Król-Kilińska Ż, Vlahoviček-Kahlina K, Vinceković M, Dragović-Uzelac V, et al. Sources, stability, encapsulation and application of natural pigments in foods. *Food Reviews International* (Internet). 2022 Nov 17 (cited 2025 Aug 30);38(8):1735–90. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/87559129.2020.1837862>
8. Ferreira AS, Pereira L, Canfora F, Silva TH, Coimbra MA, Nunes C. Stabilization of Natural Pigments in Ethanolic Solutions for Food Applications: The Case Study of *Chlorella vulgaris*. *Molecules* (Internet). 2023 Jan 1 (cited 2025 Aug 31);28(1):408. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/1/408/htm>
9. Constant PBL, Stringheta PC, Sandi D. Corantes alimentícios. *Bol Centro Pesqui Process Aliment*. 2002;203–20.
10. Novais C, Molina AK, Abreu RMV, Santo-Buelga C, Ferreira ICFR, Pereira C, et al. Natural Food Colorants and Preservatives: A Review, a Demand, and a Challenge. *J Agric Food Chem* (Internet). 2022 Mar 9 (cited 2025 Aug 31);70(9):2789–805. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35201759/>
11. Rodrigues TC. Uso de corantes vegetais na indústria de alimentos como alternativa aos corantes artificiais: uma revisão (Internet). 2021 (cited 2025 Aug 31). Available from: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/62133>
12. Matiucci MA, Rocha JDM, Chambó APS, Alves LF de S, Silva AA, Oliveira GG, et al. Ação antioxidante de pigmentos naturais em filés de tilápia do Nilo defumados. *Research, Society and Development*. 2021 Oct 5;10(13):e79101320464.

13. Landim EMC. Obtenção, caracterização e avaliação da estabilidade de pigmentos naturais microencapsulados. 2008 (cited 2025 Aug 31); Available from: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/17374>
14. Kapoor L, Ramamoorthy S. Strategies to meet the global demand for natural food colorant bixin: A multidisciplinary approach. *J Biotechnol (Internet)*. 2021 Sep 10 (cited 2025 Aug 31);338:40–51. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34271054/>
15. Beltrão Lessa Constant P, Marechal Rondon A, Rosa Elze -Jardim, Cristóvão -SE S, Araújo Pimentel A, Regina da Silva Araujo R, et al. Aplicação da bixina microencapsulada em sistemas alimentícios / Application of microencapsulated bixin in food systems. *Brazilian Journal of Development (Internet)*. 2020 Jul 16 (cited 2025 Aug 31);6(7):47604–17. Available from: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/13309>
16. Rodriguez-Amaya DB. A GUIDE TO CAROTENOID ANALYSIS IN FOODS. (cited 2025 Aug 31); Available from: <http://hni.ilsa.org/>
17. Boon CS, McClements DJ, Weiss J, Decker EA. Factors influencing the chemical stability of carotenoids in foods. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2010 Jun;50(6):515–32.
18. Policarpo VMN, Borges SV, Endo É, De Castro FT, Damico AA, Cavalcanti NB. Estabilidade da cor de doces em massa de polpa de umbu (*Spondias tuberosa* arr. cam.) no estágio de maturação verde. *Ciência e Agrotecnologia (Internet)*. 2007 (cited 2025 Aug 31);31(4):1102–7. Available from: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/z7dWJVxdB68HCyrwrXwCH8x/?format=html&lang=pt>
19. Bendokas V, Stanys V, Mažeikienė I, Trumbeckaitė S, Baniene R, Liobikas J. Anthocyanins: From the field to the antioxidants in the body. *Antioxidants (Internet)*. 2020 Sep 1 (cited 2025 Aug 31);9(9):1–16. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32887513/>
20. Căta A, Ienașcu IMC, Tănasie C, Ștefănuț MN. THERMAL DEGRADATION OF ANTHOCYANIN PIGMENTS IN BILBERRY, BLACKBERRY AND BLACK MULBERRY EXTRACTS IN THE PRESENCE OF SOME ADDED FOOD ANTIOXIDANTS. *Rev Roum Chim (Internet)*. 2019 (cited 2025 Aug 31);64(10):893–9. Available from: <http://web.icf.ro/rrch/>
21. Henrique P, De Rossi S, Pedroso De Goes Favoni S, Giannoni JA, Travaglini M, Pereira C. UTILIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE CORANTES NATURAIS EM ALIMENTOS: UMA REVISÃO. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218 (Internet)*. 2021 Dec 14 (cited 2025 Aug 31);2(11):e211941–e211941. Available from: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/941>

22. He J, Monica Giusti M. Anthocyanins: Natural colorants with health-promoting properties. *Annu Rev Food Sci Technol* (Internet). 2010 Apr (cited 2025 Aug 31);1(1):163–87. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22129334/>
23. Rocha Concenção FIG da, Stringheta PC, Ramos AM, Terayama Oliveira IH. Blueberry: Functional Traits and Obtention of Bioactive Compounds. *Am J Plant Sci*. 2014;05(18):2633–45.
24. Melo Miranda B, Vilela Junior O, Santos Fernandes S, Mendes Lemos GR, Schwan CL, Aliaño-González MJ, et al. Potential of New Plant Sources as Raw Materials for Obtaining Natural Pigments/Dyes. *Agronomy* 2025, Vol 15, Page 405 (Internet). 2025 Feb 5 (cited 2025 Aug 31);15(2):405. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/2/405/htm>
25. Matos GB, Jesus MS de, Nunes TP, Santos JAB dos, Araujo HCS, Silva AG da, et al. Corante natural azul da flor comestível clitoria (*Clitoria ternatea*): extração, caracterização e estabilidade. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA* (Internet). 2024 Feb 26 (cited 2025 Aug 31);22(2):e3454–e3454. Available from: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/3454>
26. Zahreddine S de F. OBTENÇÃO DE CORANTES NATURAIS A PARTIR DE ANTOCIANINAS EXTRAÍDAS DE FRUTAS E LEGUMES. *Anais dos Seminários de Iniciação Científica* (Internet). 2017 Nov 1 (cited 2025 Aug 31);(21). Available from: <https://ojs3.uefs.br/index.php/semic/article/view/2483>
27. Mazzone L, Scalzo J, Di Vittori L, Mezzetti B, Bottino M. Berries. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health: Second Edition* (Internet). 2017 Sep 21 (cited 2025 Aug 31);2:883–908. Available from: [/doi/pdf/10.1002/9781119158042.ch41](https://doi.org/10.1002/9781119158042.ch41)
28. Fernandes AB, Paulo S. Uso de compostos betalânicos na síntese e modulação das características de nanopartículas. 2022 Dec 20 (cited 2025 Aug 31); Available from: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46136/tde-02122022-133309/>
29. Da L, Mota SA, Vitória D, Da Costa S, Silva L, Faculdade B, et al. PIGMENTOS NATURAIS COM APLICAÇÕES EM BIOTECNOLOGIA. *Métodos Microbiológicos Tradicionais e Avançados para a Segurança de Alimentos* (Internet). 2025 (cited 2025 Aug 31);1:100–12. Available from: <http://www.editoracientifica.com.br/artigos/pigmentos-naturais-com-aplicacoes-em-biotecnologia>
30. Petcu CD, Tăpăloagă D, Mihai OD, Gheorghe-Irimia RA, Negoită C, Georgescu IM, et al. Harnessing Natural Antioxidants for Enhancing Food Shelf Life: Exploring Sources and Applications in the Food Industry. *Foods* 2023, Vol 12, Page 3176 (Internet). 2023 Aug 23 (cited 2025 Aug 31);12(17):3176. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/17/3176/htm>

31. Nieva-Echevarría B, Goicoechea E, Guillén MD. Effect of adding alpha-tocopherol on the oxidation advance during in vitro gastrointestinal digestion of sunflower and flaxseed oils. *Food Research International*. 2019 Nov 1;125.
32. Shahidi F, Pinaffi-Langley ACC, Fuentes J, Speisky H, de Camargo AC. Vitamin E as an essential micronutrient for human health: Common, novel, and unexplored dietary sources. *Free Radic Biol Med* (Internet). 2021 Nov 20 (cited 2025 Aug 31);176:312–21. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0891584921007450?utm_source=chatgpt.com
33. Che P, Zhao ZY, Glassman K, Dolde D, Hu TX, Jones TJ, et al. Elevated Vitamin E content improves all-trans β -carotene accumulation and stability in biofortified sorghum. *Proc Natl Acad Sci U S A* (Internet). 2016 Sep 27 (cited 2025 Aug 31);113(39):11040–5. Available from: [/doi/pdf/10.1073/pnas.1605689113?download=true](https://doi.org/10.1073/pnas.1605689113?download=true)
34. Yin X, Chen K, Cheng H, Chen X, Feng S, Song Y, et al. Chemical Stability of Ascorbic Acid Integrated into Commercial Products: A Review on Bioactivity and Delivery Technology. *Antioxidants* (Internet). 2022 Jan 1 (cited 2025 Aug 31);11(1). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35052657/>
35. See XZ, Yeo WS, Saptorio A. A comprehensive review and recent advances of vitamin C: Overview, functions, sources, applications, market survey and processes. *Chemical Engineering Research and Design* (Internet). 2024 Jun 1 (cited 2025 Aug 31);206:108–29. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026387622400251X>
36. Enaru B, Dreţcanu G, Pop TD, Stănilă A, Diaconeasa Z. Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation. *Antioxidants* 2021, Vol 10, Page 1967 (Internet). 2021 Dec 9 (cited 2025 Aug 31);10(12):1967. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3921/10/12/1967/htm>
37. The importance of antioxidants in food | Eufic (Internet). (cited 2025 Aug 31). Available from: <https://www.eufic.org/en/whats-in-food/article/food-should-also-look-good-why-antioxidants-are-so-important>
38. Cory H, Passarelli S, Szeto J, Tamez M, Mattei J. The Role of Polyphenols in Human Health and Food Systems: A Mini-Review. *Front Nutr* (Internet). 2018 Sep 21 (cited 2025 Aug 31);5:87. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6160559/>
39. Pateiro M, Gómez-Salazar JA, Jaime-Patlán M, Sosa-Morales ME, Lorenzo JM. Plant Extracts Obtained with Green Solvents as Natural Antioxidants in Fresh Meat Products. *Antioxidants* 2021, Vol 10, Page 181 (Internet). 2021 Jan 27 (cited 2025 Aug 31);10(2):181. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3921/10/2/181/htm>

40. Crupi P, Faienza MF, Naeem MY, Corbo F, Clodoveo ML, Muraglia M. Overview of the Potential Beneficial Effects of Carotenoids on Consumer Health and Well-Being. *Antioxidants* (Internet). 2023 May 1 (cited 2025 Aug 31);12(5). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37237935/>
41. Gutiérrez-Del-río I, López-Ibáñez S, Magadán-Corpas P, Fernández-Calleja L, Pérez-Valero Á, Tuñón-Granda M, et al. Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation. *Antioxidants* (Internet). 2021 Aug 1 (cited 2025 Aug 31);10(8). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34439512/>
42. Geng L, Liu K, Zhang H. Lipid oxidation in foods and its implications on proteins. *Front Nutr* (Internet). 2023 (cited 2025 Aug 31);10. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37396138/>
43. Fan W, Zhao J, Li Q. Effect of different food additives on the color protection of instant pumpkin flour. *Food Chemistry Advances*. 2023 Dec 1;3.
44. Geng Y, Cui K, Ding N, Liu H, Huo J, Sui X, et al. Polyphenol co-pigments enhanced the antioxidant capacity and color stability of blue honeysuckle juice during storage. *Food Chem X* (Internet). 2024 Dec 30 (cited 2025 Aug 31);24:101848. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590157524007363>
45. Zhao L, Pan F, Mehmood A, Zhang H, Ur Rehman A, Li J, et al. Improved color stability of anthocyanins in the presence of ascorbic acid with the combination of rosmarinic acid and xanthan gum. *Food Chem* (Internet). 2021 Jul 30 (cited 2025 Aug 31);351. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33636535/>
46. Che P, Zhao ZY, Glassman K, Dolde D, Hu TX, Jones TJ, et al. Elevated Vitamin E content improves all-trans β -carotene accumulation and stability in biofortified sorghum. *Proc Natl Acad Sci U S A* (Internet). 2016 Sep 27 (cited 2025 Aug 31);113(39):11040–5. Available from: </doi/pdf/10.1073/pnas.1605689113?download=true>
47. Zhang ZH, Chen J, Huang X, Aadil RM, Li B, Gao X. Natural pigments in the food industry: Enhancing stability, nutritional benefits, and gut microbiome health. *Food Chem* (Internet). 2024 Dec 1 (cited 2025 Aug 31);460(Pt 1). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39047471/>
48. Parveen B, Rajinikanth V, Narayanan M. Natural plant antioxidants for food preservation and emerging trends in nutraceutical applications. *Discover Applied Sciences* (Internet). 2025 Aug 1 (cited 2025 Aug 31);7(8):1–29. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-025-07464-6>
49. Han A, Baek Y, Lee HG. Impact of Encapsulation Position in Pickering Emulsions on Color Stability and Intensity Turmeric Oleoresin. *Foods*. 2025 Feb 1;14(3).

50. Constant PBL, Silva AG da, Borges Â da S, Melo FO, Fanchiotti FE, Silva FLAT da, et al. MICROENCAPSULAÇÃO DE PIGMENTO NATURAL DE URUCUM E AVALIAÇÃO DE SUA ESTABILIDADE. *Open Science Research (Internet)*. 2022 (cited 2025 Aug 31);1:50–65. Available from: <https://www.editoracientifica.com.br/artigos/microencapsulacao-de-pigmento-natural-de-urucum-e-avaliacao-de-sua-estabilidade>
51. Chen J, Fang W, Liu W, Liu J, Gong P. Microcapsules and Nanoliposomes Based Strategies to Improve the Stability of Blueberry Anthocyanins. *Molecules (Internet)*. 2023 Nov 1 (cited 2025 Aug 31);28(21). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37959763/>
52. Cai D, Li X, Chen J, Jiang X, Ma X, Sun J, et al. A comprehensive review on innovative and advanced stabilization approaches of anthocyanin by modifying structure and controlling environmental factors. *Food Chem (Internet)*. 2022 Jan 1 (cited 2025 Aug 31);366:130611. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814621016174>
53. dos Santos RNF, Passos TS, Fernandes R da S, Matsui KN, de Sousa FC, da Silva Chaves Damasceno KSF, et al. Effect of nanoencapsulation on the solubility and antioxidant activity of astaxanthin pigmented oil extracted from shrimp waste (*Litopenaeus vannamei*). *PLoS One (Internet)*. 2024 Nov 1 (cited 2025 Aug 31);19(11):e0313059. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0313059>
54. Su L, Nian Y, Li C. Microencapsulation to improve the stability of natural pigments and their applications for meat products. (cited 2025 Aug 31); Available from: <https://doi.org/10.48130/FMR-2023-0010>
55. MENDES LG. MICROENCAPSULAÇÃO DO CORANTE NATURAL DE URUCUM: UMA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA GOMA DO CAJUEIRO COMO MATERIAL DE PAREDE. 2012;
56. Fang JL, Luo Y, Yuan K, Guo Y, Jin SH. Preparation and evaluation of an encapsulated anthocyanin complex for enhancing the stability of anthocyanin. *LWT (Internet)*. 2020 Jan 1 (cited 2025 Aug 31);117:108543. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643819308850?utm_source=chatgpt.com
57. Özkan G, Bilek SE. Microencapsulation of Natural Food Colourants. *International Journal of Nutrition and Food Sciences* 2014, Volume 3, Page 145 (Internet). 2014 Apr 30 (cited 2025 Aug 30);3(3):145–56. Available from: <https://www.sciencepg.com/article/10.11648/j.ijnfs.20140303.13>
58. Mahae N, Pichairat D, Chankaew W. Effects of Salt Solution and Drying on the Stability of Chlorophyll Pigments in *Chara corallina*. *King Mongkut's Agricultural Journal*. 2025 Jun 23;43(3).
59. Porrarud S, Journal APIFR, 2010 undefined. Microencapsulation of Zn-chlorophyll pigment from Pandan leaf by spray drying and its characteristic. search.ebscohost.comS Porrarud, A

PraneeInternational Food Research Journal, 2010•search.ebscohost.com (Internet). (cited 2025 Aug 30); Available from:

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=19854668&AN=55096955&h=hpqS1xUyFR4zy6yfW9d43Q%2FOb0k7SkwS4ile18sC0LFxzyaLeYtXZulaKlyqPYY4HsvxLpLv6rRwL99wepFKdw%3D%3D&crl=c>

60. Jin ZL, Han K, Chen HY, Zhang XY, Qiao WL, Jia BX. Exploration of phytochemicals and biological functions of *Kadsura coccinea* pericarpium based on LC-MS and network pharmacology analysis and experimental validation. *J Funct Foods* (Internet). 2023 Apr 1 (cited 2025 Aug 31);103:105493. Available from:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464623000932?via%3Dihub>

61. Liu MH, Li YF, Chen BH. Preparation of chlorophyll nanoemulsion from pomelo leaves and its inhibition effect on melanoma cells A375. *Plants* (Internet). 2021 Aug 1 (cited 2025 Aug 31);10(8). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34451708/>

62. Gutiérrez FJ, Albillos SM, Casas-Sanz E, Cruz Z, García-Estrada C, García-Guerra A, et al. Methods for the nanoencapsulation of β -carotene in the food sector. *Trends Food Sci Technol* (Internet). 2013 Jan 1 (cited 2025 Aug 31);32(2):73–83. Available from:

https://www.academia.edu/89929477/Methods_for_the_nanoencapsulation_of_%CE%B2_carotene_in_the_food_sector

63. Wang S, Ye X, Sun Y, Liang J, Yue P, Gao X. Nanocomplexes derived from chitosan and whey protein isolate enhance the thermal stability and slow the release of anthocyanins in simulated digestion and prepared instant coffee. *Food Chem* (Internet). 2021 Jan 30 (cited 2025 Aug 31);336. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32763737/>