UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ANA BEATRIZ RIBEIRO NOBRE

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DA CASCA DA PITAIA (*Hylocereus polyrhizus*) COM ÍONS AMÔNIO NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES

Ilha Solteira - SP
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS

ANA BEATRIZ RIBEIRO NOBRE

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DA CASCA DA PITAIA (*Hylocereus polyrhizus)* COM ÍONS AMÔNIO NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Engenharia dos Materiais

Orientadora: Profª Drª Cibely da Silva Martin Sonvesso

Ilha Solteira – SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Nobre, Ana Beatriz Ribeiro.
N754c Caracterização e avaliação do enriquecimento da casca da pitaia (*Hylocereus polyrhizus*) com íons amônio na liberação de nutrientes / Ana Beatriz Ribeiro Nobre . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
69 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais, 2026

Orientador: Cibely da Silva Martin Sonvesso

Inclui bibliografia

1. Hylocereus Spp.. 2. Resíduo agroindustrial. 3. Adsorção de íons. 4. Fertilizante de liberação lenta. 5. Grau de intumescimento.

Sandra Montibeller - CRB8/060/2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O aproveitamento de resíduos agroindustriais, como a casca de pitaia, representa uma estratégia sustentável para reutilização de subprodutos, e valorização da biomassa residual, auxiliando na redução de impactos ambientais associados ao processamento de frutas. Os resultados desta pesquisa demonstram o potencial desse material lignocelulósico como matriz biodegradável para adsorção e liberação gradual de nutrientes, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e sustentáveis de fertilização e manejo da umidade do solo. Além de agregar valor a um subproduto agroindustrial, a utilização da casca de pitaia favorece a economia circular e reduz a dependência de materiais sintéticos para liberação controlada de nutrientes. Dessa forma, a tecnologia proposta apresenta potencial de aplicação na agricultura sustentável, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The use of agro-industrial waste, such as dragon fruit peel, represents a sustainable strategy for reusing by-products and valuing residual biomass, helping to reduce environmental impacts associated with fruit processing. The results of this research demonstrate the potential of this lignocellulosic material as a biodegradable matrix for adsorption and gradual release of nutrients, contributing to the development of more efficient and sustainable fertilization and soil moisture management systems. In addition to adding value to an agro-industrial byproduct, the use of dragon fruit peel promotes a circular economy and reduces dependence on synthetic materials for the controlled release of nutrients. Thus, the proposed technology has potential application in sustainable agriculture, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 12 (Responsible Consumption and Production) and SDG 13 (Action Against Global Climate Change).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Caracterização e avaliação do enriquecimento da casca da pitaia (Hylocereus polyrhizus) com íons amônio na liberação de nutrientes

AUTORA: ANA BEATRIZ RIBEIRO NOBRE
ORIENTADORA: CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência dos Materiais, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO
Data: 30/07/2026 21:53:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO (Participaçao Presencial)
Departamento de Física e Química / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 02/08/2026 10:57:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participaçao Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
gov.br FABIOLA MEDEIROS DA COSTA
Data: 30/07/2026 23:17:18-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. FABÍOLA MEDEIROS DA COSTA (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio verde - UNIRV

Ilha Solteira, 30 de julho de 2026.

Dedico este trabalho a Deus, que, em sua infinita bondade, graça e misericórdia, me sustentou, acolheu e fortaleceu para que este trabalho pudesse ser concluído.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, o autor e criador do nosso universo, o qual me permite a dádiva da vida e despertou em mim o interesse pela educação e pesquisa científica, permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

Às duas mulheres mais importantes da minha vida, minha mãe, Tomazia, e minha irmã, Caren pelo apoio, suporte e acolhimento a mim ao longo de toda a minha vida.

À Profa. Dra. Cibely da Silva Martin Sonvesso, pela orientação, pelos conselhos, pelo apoio e por todos os conhecimentos compartilhados que não foram simplesmente para o desenvolvimento de um trabalho, mas para a vida.

Aos meus irmãos de fé, tanto a Comunidade Luterana de Andradina quanto a de Ilha Solteira, pelo apoio, pelos aconselhamentos, pelas orações e pela perseverança na caminhada de fé.

As amizades construídas no PPGCM, que resultaram em boas conversas, risadas, trocas de experiências, vivências, conhecimento e, sobretudo, empatia.

Ao Grupo de Polímeros – GPOL, aos professores do grupo e aos meus colegas de laboratório, que, direta ou indiretamente, me ajudaram no desenvolvimento e na realização desta pesquisa.

A autora agradece ao Laboratório de Microscopia de Ilha Solteira (LaMIS–UNESP) por disponibilizar acesso às instalações de microscopia e ao Elton José de Souza pelo suporte técnico na aquisição das imagens.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais (PPGCM) e ao Departamento de Física e Química, pelo aporte e pela estrutura que possibilitaram o desenvolvimento da pesquisa.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de pesquisador de produtividade (processo 304612/2024-3).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio do Processo nº 2023/14967-2.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original” (Albert Einstein).

RESUMO

O aumento da geração de resíduos agroindustriais tem impulsionado pesquisas voltadas à valorização desses materiais como fonte de biomassa funcional. A casca da pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), frequentemente descartada durante o processamento do fruto, apresenta composição rica em polissacarídeos estruturais da parede celular vegetal, conferindo propriedades hidrofílicas e potencial de interação com espécies iônicas. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar a casca da pitaia e avaliar sua capacidade de enriquecimento com íons amônio, investigando o comportamento de intumescimento e a liberação de nutrientes em meio aquoso. Inicialmente, as cascas foram submetidas a um processo de despigmentação por lavagem em água deionizada a 100 °C. Os efeitos desse tratamento foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difratometria de raios X (DRX) e análise térmica (TG). Os resultados indicaram que o processo de despigmentação promoveu alterações morfológicas e estruturais sem comprometer a integridade da matriz lignocelulósica da casca. Os estudos do grau de intumescimento demonstraram capacidade de absorção de água superior a 1000%, mantendo-se estável ao longo de cinco ciclos de hidratação-reidratação. A eficiência do processo de enriquecimento com sulfato de amônio foi confirmada pelo incremento no teor de nitrogênio na composição nutricional, correspondendo a um aumento de 57,0 % para a casca natural e de 61,2 % para a casca despigmentada, acompanhado de um aumento de mais de 10 vezes no teor de enxofre. Os estudos de liberação em água indicaram equilíbrio cinético em 12 h e, além disso, verificou-se que os íons são disponibilizados gradualmente ao meio. Adicionalmente, os ensaios realizados em substrato comercial revelaram que as cascas enriquecidas apresentam capacidade de manutenção da umidade superior a 56% ao longo de 30 dias de incubação. Assim, de forma geral, os resultados sugerem que a casca da pitaia apresenta propriedades estruturais e hidrofílicas promissoras para atuar como uma matriz natural para retenção de água e liberação gradual de nutrientes.

Palavras-chave: *Hylocereus spp*., resíduo agroindustrial, adsorção de íons, fertilizante de liberação lenta, grau de intumescimento.

ABSTRACT

The growing generation of agro-industrial waste has driven research aimed at the valorization of these materials as sources of functional biomass. Pitaya peel (*Hylocereus polyrhizus*), frequently discarded during fruit processing, features a composition rich in structural polysaccharides of the plant cell wall, which confers hydrophilic properties and potential for interaction with ionic species. In this context, the present study aimed to characterize pitaya peel and evaluate its capacity for enrichment with ammonium ions, investigating its swelling behavior and nutrient release in an aqueous medium. Initially, the peels were subjected to a depigmentation process by washing in deionized water at 100 °C. The effects of this treatment were characterized by scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric analysis (TGA). The results indicated that the depigmentation process promoted morphological and structural changes without compromising the integrity of the peel's lignocellulosic matrix. Swelling degree studies demonstrated a water absorption capacity exceeding 1000%, remaining stable over five hydration-rehydration cycles. The efficiency of the enrichment process with ammonium sulfate was confirmed by the increase in nitrogen content in the nutritional composition, corresponding to a 57.0% increase for the natural peel and 61.2% for the depigmented peel, accompanied by a more than tenfold increase in sulfur content. Water release studies indicated kinetic equilibrium within 12 h, and furthermore, it was verified that the ions are gradually released into the medium. Additionally, assays conducted on a commercial substrate revealed that the enriched peels exhibit a moisture retention capacity of over 56% throughout 30 days of incubation. Thus, in general, the results suggest that pitaya peel exhibits promising structural and hydrophilic properties to act as a natural matrix for water retention and gradual nutrient release.

Keywords: *Hylocereus spp*., agro-industrial residue, ion adsorption, slow-release fertilizer, swelling degree.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da composição da parede celular vegetal. Imagem elaborada pelo autor utilizando recursos gráficos obtidos com auxílio do ChatGPT (OpenAI, 2026). 21

Figura 2 – Representação esquemática do processo de preparo e despigmentação das amostras de casca de pitaia. 28

Figura 3 – Representação do ensaio de enriquecimento da casca de pitaia natural (CN) e despigmentada (CD). *As amostras moídas foram utilizadas para comparação do processo de enriquecimento. 32

Figura 4 – Representação das etapas de preparo, imersão e análise de condutimetria da casca da despigmentada (CD). 33

Figura 5 – Micrografias ópticas (escala de 1 mm) e imagens de MEV (escala de 20 μm) das regiões interna e externa da (A, B) casca da pitaia natural e da (C, D) casca despigmentada. 37

Figura 6 – Espectros de FTIR do pó da casca da pitaia natural (CN) e da casca após o processo de despigmentação (CD). 38

Figura 7 – Difratogramas de raios X obtidos para as amostras da casca da pitaia "*in natura*" (CN) e despigmentada (CD). 40

Figura 8 – Curvas termogravimétricas de TG e DTG obtidas para (A) casca natural (CN) e (B) casca despigmentada (CD). 41

Figura 9 – Imagem da casca despigmentada (CD) seca e após a imersão em água. 43

Figura 10 – Variação do grau de intumescimento da casca despigmentada (CD) ao longo do tempo obtido para cinco ciclos de hidratação-reidratação. 44

Figura 11 – Variação dos valores de condutividade das amostras casca natural (CN) e casca despigmentada (CD) em água (controle) e na presença de $(NH_4)_2SO_4$, em função do tempo. 45

Figura 12 – Imagem obtida de aproximadamente 2 g das amostras processadas na forma de pó para (A) casca da pitaia natural (CN) e (B) da casca despigmentada (CD). 47

Figura 13 – Imagens de MEV das regiões externa (a e b) e interna (a1 e b1) das cascas CN e CD, e imagens em maior resolução das regiões externa (A e C) e interna (B e D) das cascas CN e CD após o processo de enriquecimento. Imagens com escala de 20 μm. 49

Figura 14 – Espectros de FTIR obtido para a cascas de (A) pitaia natural (CN) e (B) despigmentada (CD) antes e após o enriquecimento com sulfato de amônio. (C) Comparação dos espectros de FTIR obtidos para as amostras enriquecidas. 50

Figura 15 – (A) Curvas termogravimétricas de (A) TG e (B) DTG obtidos para as cascas despigmentada (CD) antes e após o processo de enriquecimento com $(NH_4)_2SO_4$ 51

Figura 16 – Valores de intumescimento obtidos para as amostras da casca da pitaia naturais e enriquecidas com $(NH_4)_2SO_4$. Valores de intumescimento obtidos após 48 h de imersão em água deionizada. 52

Figura 17 – Variação dos valores de condutividade durante o processo de liberação de íons em meio aquoso para amostras de casca despigmentada (CD) previamente enriquecidas, avaliada em 48 h. O *inset* (a) corresponde a foto das medidas de condutividade realizadas in situ durante o processo de liberação. 54

Figura 18 – Valores dos teores de macronutrientes (N, P e K) teor remanescente na CD + $(NH_4)_2SO_4$ após 48h de liberação em solução com valores de pH de 3,0; 8,0 e 10,0. 58

Figura 19 – Imagens de câmera digital e microscópio óptico das amostras da casca da pitaia após 30 dias de incubação em substrato. 60

Figura 20 – Variação dos valores de retenção da umidade da casca de pitaia (CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$) em função do tempo durante biodegradação em substrato 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo da composição química do pó da casca da pitaia da espécie e de outras frutas 21

Tabela 2 – Dados da massa média inicial da casca despigmentada (CD), perda de massa em porcentagem (%), médias da massa úmida ao final da imersão da casca em água e respectiva porcentagem de intumescimento total no final de cada ciclo. 43

Tabela 3 – Teores de macro e micronutrientes da casca da pitaia natural (CN) e da casca da pitaia despigmentada (CD) após processo de enriquecimento com sulfato de amônio $(NH_4)_2SO_4$ 46

Tabela 4 – Teores de macro e micronutrientes remanescentes nas cascas da pitaia despigmentada (CD) após estudo de liberação de íons de amônia em água deionizada, avaliados nos tempos de 12, 24 e 48 horas. 55

Tabela 5 – Análise dos teores de macro e micronutrientes presentes em água (CD) após estudo de liberação das cascas enriquecidas com íons amônia, avaliado nos tempos 12, 24 e 48 horas. 56

Tabela 6 – Teores de macro e micronutrientes determinados na solução após 48h de liberação pela casca enriquecida (CD+$(NH_4)_2SO_4$) em diferentes valores de pH. 57

Tabela 7 – Teores de macro e micronutrientes determinados na casca enriquecida (CD+$(NH_4)_2SO_4$) após 48 h de liberação em diferentes valores de pH. 58

Tabela 8 – Massa inicial, massa final e perda de massa da casca de pitaia (CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$) após teste de biodegradação em substrato de 15 e 30 dias de incubação. 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CD	Casca despigmentada
CD+$(NH_4)_2SO_4$	Casca despigmentada e enriquecida com sulfato de amônio
CDU	Crotonilideno diureia
CN	Casca natural
CN+$(NH_4)_2SO_4$	Casca natural enriquecida com sulfato de amônio
DRX	Difratometria de Raio X
DTG	Derivada termogravimétrica
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 PITAIA 20
2.1.1 Composição da parede celular vegetal 20
2.2 POLÍMEROS HIDROFÍLICOS DOS HIDROGÉIS 23
2.3 A IMPORTÂNCIA DE NUTRIENTES NA AGRICULTURA 24
3 OBJETIVOS 26
3.1 OBJETIVO GERAL 26
3.2 ESPECÍFICOS 26
4 METODOLOGIA 27
4.1 MATERIAIS 27
4.2 PREPARAÇÃO, DESPIGMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS CASCAS DE PITAIA 27
4.2.1 Preparo e despigmentação das cascas de pitaia 27
4.2.2 Caracterização da casca de pitaia CN e CD 28
4.3 ESTUDO DAS PROPRIEDADES HIDROFÍLICAS DA CASCA 30
4.4 PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO COM SULFATO DE AMÔNIO 31
4.4.1 Cinética de enriquecimento 31
4.4.2 Enriquecimento 32
4.4.3 Caracterização do processo de enriquecimento 32
4.5 LIBERAÇÃO DE ÍONS NH_4^+ 32
4.5.1 Monitoramento da liberação iônica por condutimetria 33
4.5.2 Caracterização do processo de liberação em água 34
4.6 ESTUDO DA APLICAÇÃO DA CASCA DA PITAIA (CD) EM SOLO 34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 36
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESPIGMENTAÇÃO 36
5.1.1 Caracterização da morfologia da casca CN e CD. 36
5.1.2 Caracterização estrutural em nível molecular 38
5.1.3 Difratometria de raios X 39
5.1.4 Análise Termogravimétrica 41
5.2 EFEITO DE INTUMESCIMENTO E CICLOS DE HIDRATAÇÃO 42
5.3 ETAPA DE ENRIQUECIMENTO COM ÍONS AMÔNIO 44

5.3.1 Análises por condutimetria: cinética de enriquecimento e efeitos do pigmento 45
5.3.2 Análise dos teores de macro e micronutrientes antes e após enriquecimento 46
5.3.3 Efeitos morfológicos, estruturais e térmicos após enriquecimento 48
5.3.4 Efeito do enriquecimento nas propriedades hidrofílicas 52
5.4 LIBERAÇÃO DE ÍONS AMÔNIO EM ÁGUA 53
5.4.1 Análise por condutimetria do processo de liberação iônica em água 53
5.4.2 Análise dos teores de nutrientes liberados em água deionizada 55
5.4.3 Análise dos teores nutricionais liberados em diferentes condições de pH 56
5.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CASCA DESPIGMENTADA (CD) EM SOLO 59
6 CONCLUSÃO 62
REFERÊNCIAS 63

1 INTRODUÇÃO

A pitaia, uma fruta exótica de origem em regiões tropicais e subtropicais das Américas, principalmente da América Central e do Sul, pertence à ordem Caryophyllales e à família Cactaceae. Atualmente, seu cultivo se difundiu a diversas regiões do mundo, principalmente em países asiáticos, onde houve capacidade de adaptação às condições climáticas da região e ao interesse comercial atrelado ao fruto (Arivalagan et al., 2021). Popularmente conhecida como fruta-do-dragão, a pitaia tem dois gêneros descritos pela literatura: *Hylocereus* e *Selenicereus*. Dentre as espécies mais cultivadas, destacam-se *Hylocereus undatus* e *Hylocereus polyrhizus*, conhecidas popularmente por pitaia de polpa branca e de polpa vermelha, respectivamente. Ambas as espécies estão entre as principais cultivadas mundialmente e no Brasil (Tarte et al., 2023).

No contexto de produção nacional, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) relataram que o país apresentou área colhida da cultura da pitaia de aproximadamente 536 hectares e produção de 1.459 toneladas. Entre os estados produtores, São Paulo, Santa Catarina, Minas Gerais e Pará destacaram-se pela produção acima de 100 toneladas em 2017. Em relação à produção mundial, o maior destaque é a região da Ásia-Pacífico, em países como o Vietnã, China e a Indonésia e, de acordo com Relatório de Tendências e Previsões de Crescimento da Pitaia, estima-se aumento da produtividade em cerca de 4,40% até 2029 (Passos et al., 2023) .

O interesse em sua produção e comercialização pode estar principalmente ligado à composição e ao alto teor nutritivo. Dentro do contexto nutricional, a pitaia é fonte de vitamina C, cálcio, ferro, fósforo, potássio, além de ser fonte de carboidratos e possuir alta concentração de pigmentos naturais, presentes principalmente na polpa da fruta. Essas características já demandaram mudanças no padrão de produção e venda da fruta, como no caso da China, adequando-se à utilização de LEDs para cultivo fora da temporada e de varejistas nos Estados Unidos, que ampliaram o espaço direcionado à pitaia nas prateleiras (Mordor Intelligence, 2026).

Apesar da casca da pitaia ser rica em polissacarídeos estruturais, como celulose, hemicelulose e pectina (Bakar et al., 2011), o consumo agroindustrial ainda está majoritariamente no consumo da polpa, que corresponde a dois terços da massa do fruto. Assim, o consumo da polpa acarreta, na maioria dos casos, no descarte da casca, que corresponde a um terço da massa do fruto (Andrade et al., 2024).

Com o intuito de minimizar a geração do resíduo da casca e reaproveitar os subprodutos agroindustriais, pesquisas têm avaliado as propriedades físico-químicas da casca e analisado a possibilidade do uso em diferentes aplicações. Exemplos de estudos recentes visam à aplicação do pigmento extraído da casca para o aumento nutricional de outros alimentos (Reyes-García et al., 2024) ou à substituição de ingredientes para sua fabricação (Utpott et al., 2020). Pesquisas também reportam a obtenção de embalagens inteligentes, a partir do extrato da betalaína, composto presente no pigmento da pitaia vermelha (Qin et al., 2020).

Além das pesquisas direcionadas às propriedades dos pigmentos, outras abordagens têm explorado o potencial proveniente dos biopolímeros constituintes da casca, devido às características hidrofílicas e estruturais capazes de absorver água e interagir com íons. As aplicações estão principalmente relacionadas à extração desses biopolímeros para a fabricação de bioplásticos (Listyarini et al., 2020), no processamento da casca para a biossorção de metais pesados (Nguyen et al., 2023; Wattanakornsiri et al., 2022) e para a remoção de corantes em água (Jawad et al., 2021). No entanto, ainda não há relatos sobre a aplicação desses subprodutos em desenvolvimento tecnológico para o próprio setor agrícola.

No contexto agrícola nacional, a eficiência no uso de insumos representa um dos fatores críticos para a sustentabilidade econômica e produtiva. Segundo dados da Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos (Brasil, 2020) o manejo convencional de fertilizantes apresenta elevados custos de aquisição do insumo no mercado internacional, o que encarece os custos de produção e desafia a definição de doses economicamente viáveis para o agricultor. Atualmente, o Brasil possui vulnerabilidade externa no setor de fertilizantes, importando entre 80% e 90% dos adubos nitrogenados que consome. A adubação suplementar de nitrogênio (N) é frequentemente indispensável para atender às exigências fisiológicas das grandes culturas, principalmente para o desenvolvimento vegetal, diretamente relacionado à síntese de aminoácidos, proteínas e clorofila, sendo requerido em grandes quantidades pelas culturas agrícolas (Teixeira Filho et al., 2014; Galindo et al., 2016).

Além do desafio econômico, o uso de fontes nitrogenadas altamente solúveis é marcado por elevadas perdas no solo. Estudos apontam que cerca de 20% a 50% do N aplicado via fertilizantes convencionais é perdido para o ambiente antes de ser assimilado pelas plantas (Abalos et al., 2014; Pan et al., 2016). Essas perdas ocorrem por meio de processos dinâmicos no solo, incluindo a volatilização de amônia (NH_3) em meios alcalinos, a lixiviação de nitrato (NO_3^-) para águas subterrâneas e a emissão de óxido nitroso (N_2O), gerado durante processos de desnitrificação em solos saturados (Havlin et al., 2016; Passos et al., 2023).

Diante disso, o uso de materiais, como os hidrogéis sintéticos ou de origem naturais voltados ao desenvolvimento de sistemas de liberação modificada, tem como intuito proporcionar equilíbrio entre a disponibilidade de nutrientes e a demanda das plantas (Rebelo et al., 2025). Entretanto, apesar das vantagens associadas às propriedades dos hidrogéis sintéticos, como os sintetizados por acrilatos e poliacrilamidas, estes podem apresentar limitações relacionadas à baixa biodegradabilidade e à persistência no ambiente, levando também a preocupações quanto aos impactos ambientais do uso desses materiais a longo prazo (Yang et al., 2021). Por essa razão, tem-se explorado a aplicação de hidrogéis à base de polímeros naturais, pois conferem menor impacto ambiental e maior compatibilidade com sistemas biológicos e agrícolas (Tariq et al., 2023).

Estudos demonstram que hidrogéis derivados de polissacarídeos, como amido, celulose e alginato, têm sido aplicados na agricultura para incorporação de fertilizantes nitrogenados e outros nutrientes, promovendo maior retenção de água no solo e disponibilização de forma gradativa dos nutrientes (Meng et al., 2019; Supare & Mahanwar, 2022; van der Merwe et al., 2022). Assim, torna-se relevante aprofundar a compreensão acerca do comportamento desses biopolímeros sob processos de modificação, particularmente em sistemas de liberação e no desenvolvimento de materiais com funcionalidades específicas para uso ambiental e agrícola. Dessa forma, este projeto de pesquisa investigou o potencial da casca da pitaia em sua forma natural como matriz funcional para adsorção e liberação gradual de nutrientes, em especial como íons amônio, explorando suas propriedades hidrofílicas e sua capacidade de interação com espécies iônicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PITAIA

A pitaia pertence à família Cactaceae, é considerada uma fruta exótica e que visualmente atrai a atenção devido a sua coloração e variedade. Os gêneros Hylocereus e Selenicereus são nativos do norte da América do Sul e da América Central. Dentre os gêneros existem as espécies *Selenicereus megalanthus* (Schum.) (pitaia amarela), *Hylocereus undatus* (Haw.) (pitaia vermelha de polpa branca), *Hylocereus costaricenes* (pitaia vermelha de polpa arroxeada), e *Hyloceus polyhizus* (pitaia vermelha de polpa avermelhada). Dentre as variedades se destacam espécies *Hylocereus undatus* e *Hylocereus polyrhizus*, pois são amplamente cultivadas em regiões tropicais e subtropicais devido à adaptação dessas plantas a condições climáticas variadas e à crescente demanda por frutas com propriedades funcionais (Le Bellec et al., 2006; Passos et al., 2023).

A expansão da cultura da pitaia nas últimas décadas tem sido acompanhada pelo aumento do interesse científico na caracterização química e funcional do fruto e de seus subprodutos (Taharuddin et al., 2023). Além do consumo *in natura*, a pitaia tem sido explorada industrialmente para a produção de sucos, concentrados, bebidas fermentadas e ingredientes funcionais. A polpa do fruto apresenta composição rica em vitaminas, compostos fenólicos e pigmentos naturais da classe das betalaínas, que apresentam atividade antioxidante e potencial aplicação como corantes naturais em alimentos (Fathordoobady et al., 2019).

O processamento agroindustrial da pitaia gera quantidades expressivas de resíduos orgânicos, principalmente a casca, que pode representar aproximadamente 22% a 37% da massa total do fruto, dependendo da espécie e do estágio de maturação (Tarte et al., 2023). Considerando o crescimento da produção global da fruta, esse resíduo tem sido apontado como uma fonte potencial de biomassa com valor agregado, especialmente devido à presença de compostos estruturais e bioativos em sua composição.

2.1.1 Composição da parede celular vegetal

A casca da pitaia apresenta composição típica de biomassa lignocelulósica, formada principalmente por polissacarídeos estruturais associados à parede celular vegetal. Estudos de caracterização química indicam que esse subproduto contém quantidades significativas de celulose, hemicelulose e lignina, além de pectina e outros compostos minoritários presentes na matriz estrutural do tecido vegetal, conforme apresado na Tabela 1 (Nur et al., 2023).

Tabela 1 – Comparativo da composição química do pó da casca da pitaia da espécie e de outras frutas

Casca	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinza (%)	Fibra (%)	Ref.
H. polyrhizus	34,45	-	6,73	17,40	27,63	(Hanan Taharuddin et al., 2023)
H. polyrhizus	9,25	-	37,18	-	-	(Bakar et al., 2011)
H. polyrhizus	-	-	-	14,29	31,40	(Chia & Chong, 2015)
Banana	13,2	19,55	16	2,08	-	(Jacqueline & Velvizhi, 2024)
Mamão	18,01	15,9	18,39	5,2	-	
Maracujá	28,58	23,01	36,18	5,71	-	(Wijaya et al., 2017)

A presença dessa fração fibrosa está diretamente associada à organização da parede celular vegetal, formada por uma rede tridimensional de biopolímeros estruturais responsáveis por conferir resistência mecânica e estabilidade às células vegetais. Nessa estrutura, microfibrilas de celulose encontram-se envolvidas por uma matriz composta por hemicelulose, lignina e pectina, como ilustrado na Figura 1.

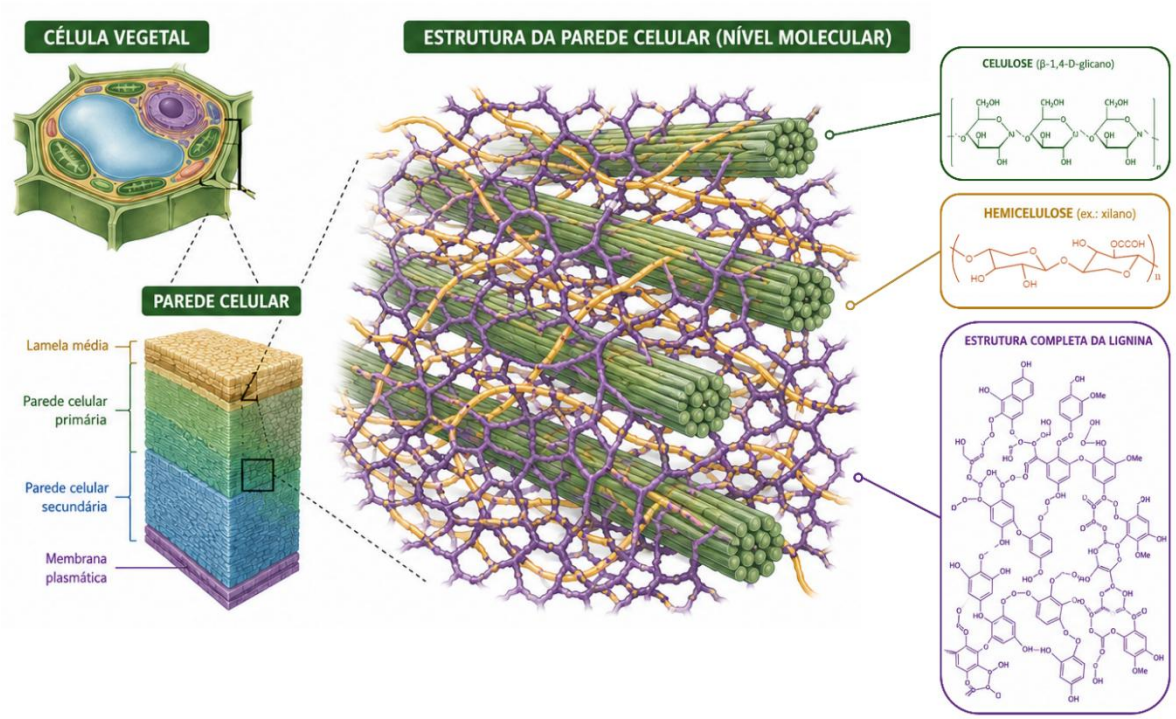


Figura 1 – Representação esquemática da composição da parede celular vegetal. Imagem elaborada pelo autor utilizando recursos gráficos obtidos com auxílio do ChatGPT (OpenAI, 2026).

Entre os principais componentes dessa matriz destacam-se a celulose, a hemicelulose e a pectina, cuja organização estrutural determina propriedades físicas e químicas importantes do

material vegetal (Muhammad et al., 2020). A celulose constitui o principal polissacarídeo estrutural da parede celular vegetal. Esse polímero é formado por cadeias lineares de unidades de β-D-glicose ligadas por ligações β (1→4), que se organizam em microfibrilas altamente cristalinas (Figura 1). A presença de numerosos grupos hidroxila ao longo da cadeia polimérica permite a formação de ligações de hidrogênio intermoleculares, responsáveis pela elevada estabilidade estrutural da celulose e pela sua capacidade de interação com moléculas de água (Rebelo et al., 2025). A hemicelulose consiste em um conjunto heterogêneo de polissacarídeos com estrutura ramificada e menor grau de cristalinidade em comparação à celulose. Esses polímeros atuam como agentes de ligação entre as microfibrilas de celulose, contribuindo para a organização estrutural da parede celular e influenciando propriedades como porosidade e flexibilidade do material vegetal (Zhang et al., 2024).

Outro componente relevante é a pectina, um polissacarídeo complexo rico em ácido galacturônico que apresenta elevada afinidade por água. A pesquisa de Zaidel et al. (2017) demonstrou que a casca da pitaia constitui uma fonte relevante de pectina, com rendimentos de extração consideráveis obtidos a partir desse resíduo. A presença de grupos carboxílicos na estrutura desse polímero permite a interação com cátions metálicos e outras espécies químicas presentes em solução, favorecendo processos de adsorção e formação de estruturas gelificantes.

Além da composição lignocelulósica, estudos de caracterização físico-química demonstram que a casca da pitaia apresenta elevada capacidade de retenção de água. Valores de capacidade de retenção hídrica próximos de 98,6%, foram reportados na pesquisa desenvolvida por Hanan Taharuddin et al. (2023), indicando elevada afinidade do material com o meio aquoso. Essa propriedade está relacionada à presença de grupos hidroxila e carboxila nos polissacarídeos estruturais, que favorecem interações intermoleculares com moléculas de água.

A elevada quantidade de fibras estruturais presentes na casca também tem sido associada ao seu potencial de aplicação em diferentes processos tecnológicos. Fathordoobady et al. (2019) constataram elevada concentração de fibras alimentares totais, característica comum a resíduos lignocelulósicos derivados de frutas tropicais. Essa composição contribui para propriedades físicas importantes, como porosidade, absorção de água e estabilidade estrutural. A interação entre esses biopolímeros resulta em uma matriz lignocelulósica altamente funcional. Essas propriedades intrínsecas da matriz celulósica posicionam resíduos agroindustriais como precursores ideais para possível utilização no desenvolvimento de materiais, tais como hidrogéis sustentáveis (Jimenez-Garcia et al., 2022).

2.2 POLÍMEROS HIDROFÍLICOS DOS HIDROGÉIS

Hidrogéis são materiais, dentre as várias classes de poliméricos, caracterizados pela presença de redes tridimensionais hidrofílicas capazes de absorver e reter grandes quantidades de água sem sofrer dissolução. Essa propriedade está associada à presença de grupos funcionais hidrofílicos nas cadeias poliméricas, como hidroxilas, carboxilas e aminas, que promovem interações intermoleculares com moléculas de água. A capacidade de absorção de água dos hidrogéis depende de fatores como a densidade de reticulação da rede polimérica, a natureza dos grupos funcionais presentes na cadeia e a estrutura porosa do material. Os hidrogéis podem ser de origem sintética ou natural, dependendo da natureza dos polímeros que constituem sua rede tridimensional.

Os hidrogéis sintéticos são produzidos por polímeros obtidos por rotas petroquímicas ou pela síntese de monômeros específicos, como acrilamida, ácido acrílico. Esses materiais apresentam elevada versatilidade estrutural, devido à possibilidade de ajustes da composição polimérica, do grau de reticulação e das condições de síntese. Entre os polímeros sintéticos destacam-se o poli(acrilato), poli(acrilamida), poli(álcool vinílico) e poli(etilenoglicol), os quais apresentam elevada capacidade de absorção de água e estabilidade estrutural (Bashir et al., 2020). Por outro lado, os hidrogéis naturais são formados por biopolímeros naturais, como celulose, amido e quitosana, essas características são determinadas pela organização molecular dos polissacarídeos e pela presença de interações intermoleculares que estabilizam a rede tridimensional (Yang et al., 2021).

Além da elevada capacidade de absorção de água, hidrogéis apresentam estrutura porosa que permite a difusão de moléculas e íons no interior da matriz polimérica. Em condições de baixa disponibilidade hídrica, hidrogéis podem absorver água durante períodos de irrigação ou precipitação e liberá-la gradualmente no ambiente radicular das plantas (Tariq et al., 2023). A retenção hídrica permite que hidrogéis sejam utilizados como matrizes para incorporação de fertilizantes. Nesse tipo de aplicação, os nutrientes são incorporados à estrutura polimérica e liberados gradualmente por processos de difusão controlada.

A aplicação de hidrogéis sintéticos é vasta, como contextos industriais, biomédicos, sensores e produtos de higiene, entretanto, esses materiais possuem limitações quanto à biodegradabilidade e persistência no ambiente (Catoira et al., 2019). Mesmo diante das limitações, o uso desse material oferece propriedades promissoras para a incorporação de íons essenciais presentes nos fertilizantes. Nesse contexto, o estudo desenvolvido por Aouada et al. (2008) utilizou hidrogéis sintéticos de poli(acrilamida) para liberação controlada de NH_4^+ e K^+

contidos em fertilizantes; os resultados obtidos apresentaram eficiência na fixação de 74,3 % e 84,9 %, respectivamente. Em outro estudo, onde se utilizou hidrogéis baseados em poli(etilenoglicol) verificou-se a possibilidade modular a liberação de moléculas incorporadas por meio de interações químicas reversíveis, permitindo ajustar a taxa de liberação em função de temperatura e densidade de sítios reativos da rede polimérica (Koehler et al., 2013).

Por outro lado, o uso de hidrogéis à base de biopolímeros (hidrogéis naturais) vem aumentando como alternativa aos polímeros sintéticos, pois oferecem algumas vantagens, como a biodegradabilidade (Rather et al., 2022). Neste caso, são comumente usados para aumentar a eficiência do solo, pois fornecem água e nutrientes às plantas de forma gradual e prolongada (Rizwan et al., 2021). Exemplos de aplicações nesse contexto envolvem o desenvolvimento de hidrogéis à base de amido de mandioca reticulado com ácido cítrico para incorporação de amônio e potássio (Chamorro et al., 2024). Os autores observaram que o material apresentou capacidade de retenção de água superior a 300% da massa seca e promoveu a liberação gradual de nutrientes ao longo de vários dias em meio aquoso. Portanto, combinar hidrogéis naturais e fertilizantes torna-se prática com foco em diminuir os impactos ambientais e reduzir a dependência de irrigações frequentes (Ramli, 2019).

Embora resíduos agroindustriais venham sendo investigados como matrizes carreadoras para a liberação de nutrientes e condicionadores físicos do solo, a utilização de cascas de frutas que aliam de forma simultânea, a capacidade de retenção hídrica ao fornecimento nutricional ainda representa uma vertente pouco explorada na literatura (Gonçalves et al., 2025). Neste cenário, a utilização da casca de pitaia surge como alternativa tecnológica, justificada por sua composição bioquímica, rica em pectina e polissacarídeos estruturais altamente hidrofílicos. Ao explorar esse comportamento análogo ao de hidrogéis, sem recorrer a processos de extração química ou à síntese de polímeros isolados, preserva-se a integridade da biomassa nativa. A incorporação de espécies iônicas fertilizantes a esse resíduo pode viabilizar sua aplicação como biofertilizante, permitindo aliar retenção hídrica e liberação gradual de nutrientes em um único sistema (Tarte et al., 2023).

2.3 A IMPORTÂNCIA DE NUTRIENTES NA AGRICULTURA

Os benefícios quanto à adição de elementos minerais em solos não são atuais; o estudo desenvolvido por Justus Von Liebig por volta de 1840 possibilitou a compreensão da necessidade nutricional das plantas, quais as fontes de obtenção e práticas agrícolas necessárias, com início à produção de fertilizantes minerais. Apesar da importância para a produção

agrícola, o uso de fertilizantes convencionais apresenta limitações quanto à eficiência de aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, pois liberam nutrientes a uma taxa muito mais rápida do que a exigida pelas plantas. Assim, mais de 50% do fertilizante nitrogenado aplicado anualmente é desperdiçado através de escoamentos, lixiviação, emissão de gás na forma de N_2O e gás NH_3, sendo necessário o aumento da eficiência da adubação nitrogenada um grande desafio para a agricultura (Priya et al., 2024; Xia et al., 2025)

Quando aplicado diretamente às plantas, apenas cerca de 30% a 35% dos nutrientes são absorvidos, sendo o uso excessivo de fertilizantes minerais tem prejudicial ao meio ambiente, aumentando os níveis de gases de efeito estufa e promovendo a eutrofização (Govil et al., 2024; Jiaying et al., 2022; Xia et al., 2025). Além da baixa eficiência no uso de fertilizantes minerais, outro problema relevante está relacionado ao processo de fabricação desses fertilizantes. A produção de fertilizantes à base de nitrogênio é responsável por emissões de gases de efeito estufa devido às altas necessidades energéticas. Da mesma forma, a mineração e o processamento de rochas fosfatadas, matéria-prima essencial para os fertilizantes fosfatados, podem causar impactos ambientais consideráveis, incluindo a liberação de elementos radioativos, metais pesados e outros contaminantes. O mesmo cenário ocorre na produção de potássio, que constitui outro macronutriente das formulações de fertilizantes, podendo induzir desequilíbrios nos ecossistemas regionais. Em conjunto, essas atividades têm potencial para contaminar o solo, o ar e a água (Sachdeva et al., 2025; Singh et al., 2024).

Por essa razão, pesquisadores têm buscado estratégias para o melhor aproveitamento de fertilizante à base de nitrogênio. Dentre as pesquisas, a realizada por Priya et al., (2024) descreveram que os fertilizantes de liberação lenta oferecem uma solução promissora para resolver os problemas causados pelos fertilizantes comuns, pois estes permitem o controle preciso sobre a liberação do conteúdo químico de fertilizantes, melhorando a eficiência do uso de nutrientes. A pesquisa de Abbas et al. (2022) explica que fertilizantes à base de lignina vêm ganhando notoriedade na produção de fertilizantes de liberação controlada, pois este biopolímero funciona como um inibidor efetivo da atividade da enzima urease, diminuindo assim, a taxa de degradação da ureia e garantindo o fornecimento prolongado de nutrientes na solução do solo para as plantas. Com isso, pesquisas nessa área visam reduzir e tornar mais eficiente o uso de fertilizantes sintéticos ou desenvolver alternativas mais sustentáveis (Ramli, 2019).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a casca de pitaia vermelha (*Hylocereus polyrhizus*) e avaliar seu potencial como material enriquecido com íons amônio, visando à liberação gradual de nutrientes.

3.2 ESPECÍFICOS

- Investigar as propriedades químicas e estruturais, como também as alterações morfológicas decorrentes do processo de despigmentação.
- Determinar o efeito do intumescimento e ciclos de hidratação-reidratação das cascas de pitaia;
- Avaliar a eficiência do enriquecimento com íons amônio na casca através das análises de macronutrientes;
- Caracterizar as alterações morfológicas, químicas e estruturais decorrentes do processo de enriquecimento com íons amônio;
- Monitorar a cinética de enriquecimento e liberação de íons por condutimetria;
- Analisar o perfil de liberação de íons amônio em meio aquoso e sob diferentes condições de pH;
- Avaliar a biodegradação da casca e os efeitos da capacidade de intumescimento em solo.

4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

A pitaia de polpa vermelha, espécie *Hylocereus polyrhisus,* foi utilizada nesse trabalho como fonte de resíduo agroindustrial. As frutas foram adquiridas em mercados locais na cidade de Ilha Solteira (SP). A etapa de enriquecimento foi realizada utilizando sulfato de amônio de alta pureza ($(NH_4)_2SO_4$, Sigma-Aldrich). Todas as etapas de tratamento da casca, enriquecimento e preparo de soluções foram realizadas utilizando água deionizada, com condutividade elétrica média de 1,3µS/cm.

4.2 PREPARAÇÃO, DESPIGMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS CASCAS DE PITAIA

4.2.1 Preparo e despigmentação das cascas de pitaia

Inicialmente, foi realizada a remoção dos excessos de polpa e irregularidades superficiais da casca, removendo as pontas das cascas da pitaia, com o intuito de obter uma superfície mais uniforme. Apesar de não ser um procedimento esperado para reutilização de resíduos, foi realizada com o intuito de otimizar o corte para as demais etapas. Em seguida, foi realizado o corte padronizado da casca utilizando um cortador de legumes de mesa, obtendo-se amostras em formato cúbico com área superficial de aproximadamente 1 cm^2. As cascas cortadas foram separadas em dois grupos: (1) casca natural, **CN –** utilizada sem qualquer tratamento prévio; e (2) casca despigmentada, **CD –** realizado processo de remoção dos pigmentos. Os processos de corte, despigmentação e secagem das amostras estão ilustrados na Figura 2.

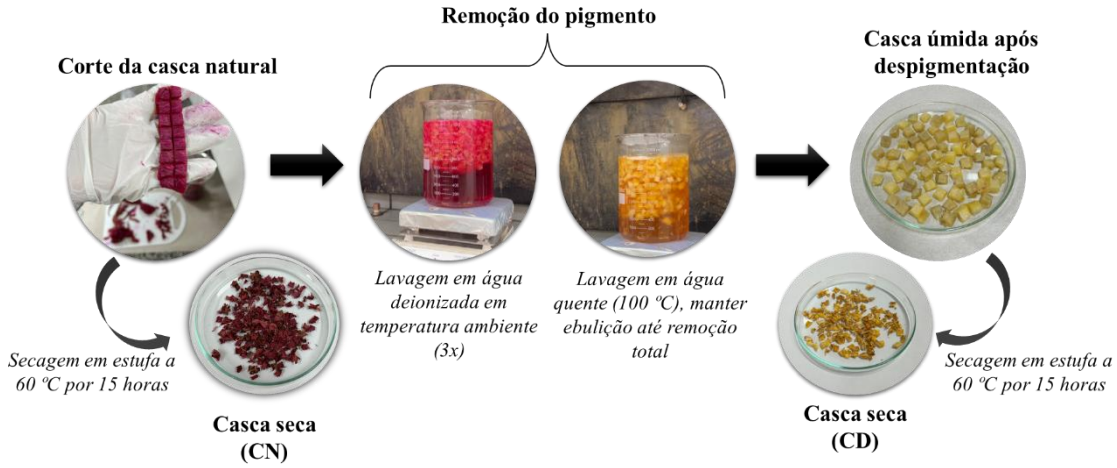


Figura 2 – Representação esquemática do processo de preparo e despigmentação das amostras de casca de pitaia.

Logo após o corte, as cascas CN, foram secas em estufa a 60 ºC por 15 h, após resfriamento à temperatura ambiente foram armazenadas em sacos plásticos e em mantidos sob refrigeração a 8 ºC. Para a obtenção das cascas CD foi realizado o processo de despigmentação com lavagem a quente. Inicialmente, as cascas cortadas foram lavadas com água deionizada à temperatura ambiente para remoção inicial e parcial do pigmento de coloração rosa, sendo repetido o processo três vezes. Em seguida, as cascas foram transferidas para um béquer contendo água previamente aquecida a 100 °C, permanecendo sob aquecimento a 100ºC até a completa extração do pigmento, o qual é observado pela mudança de cor de rosa para amarelo. Ao final desse procedimento, amostras despigmentadas, CD, também foram secas em estufa a 60 °C por 15 h, resfriadas, armazenadas em sacos plásticos e mantidas sob refrigeração a 8º C.

4.2.2 Caracterização da casca de pitaia CN e CD

O efeito do processo de despigmentação na morfologia superficial, estrutura e composição elementar da casca da pitaia foi avaliado por Microscopia óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Difratometria de raios X (DRX) e Análise Térmica (TG), e os teores de macro e micronutrientes. Essas caracterizações foram realizadas para compreender o processo de despigmentação, sendo conduzidas antes de qualquer processo de enriquecimento.

Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por microscopia foi realizada para investigar a morfologia da superfície da casca e avaliar os efeitos dos processos de despigmentação. Para a obtenção das imagens de MEV, as cascas secas e cortadas foram fixadas em *stubs* com fita condutora de carbono e recobertas com uma fina camada de ouro utilizando um *Sputter Coater*. As análises foram conduzidas no equipamento Carl Zeiss, modelo EVO LS15. Com intuito de complementar a análise morfológica e microestrutural, imagens de microscopia óptica foram obtidas para as cascas CN e CD frescas (antes do processo de secagem). As imagens ópticas foram obtidas utilizando um estereomicroscópio Zeiss, Discovery V8, acoplado a câmera digital AxioCam, operando em modo de iluminação incidente e apresentadas com barra de escala de 1 mm.

Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de FTIR foi utilizada para identificar grupos químicos e possíveis alterações estruturais no material após o processo de despigmentação. Para a obtenção dos espectros, 1 mg das cascas CN e CD trituradas foram homogeneizadas com 100 mg de KBr, e obtidas pastilhas. Os espectros foram obtidos na faixa espectral de 400–4000 cm^{-1}, com 64 varreduras e resolução 4 cm^{-1}, utilizando um Espectrômetro infravermelho com Transformada de Fourier, Modelo NEXUS 670 (Nicolet).

Análise de Difratometria de Raios X (DRX)

As medidas foram conduzidas em difratômetro Shimadzu XDR-6000, com radiação de cobre (Cu), com comprimento de onda de 1,5418 Å com taxa de varredura de 2º/min na faixa de 5,0° a 60,0° (2θ). As amostras CN e CD foram analisadas na forma de pó em suporte de vidro.

Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) foi empregada para caracterizar o comportamento de degradação térmica da casca em função da perda de massa com o aumento da temperatura, e analisar as possíveis diferenças de composição existentes entre as amostras de CN e CD. Para a realização das medidas, aproximadamente 10 mg de CN e CD foram acondicionados em cadinho de alumina e submetidos a aquecimento de 0 até 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, com fluxo de 100 mL/min de gás nitrogênio. As medidas foram realizadas em analisador termogravimétrico SDT Q600 (TA Instruments).

Análise dos teores de macro e micronutrientes

Para a análise dos teores de macro e micronutrientes das cascas as amostras foram utilizadas aproximadamente 2 g das cascas trituradas, obtendo o material em forma de pó. As análises foram realizadas no Laboratório de Nutrição de Plantas do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da FEIS/UNESP. O teor de nitrogênio (N) foi determinado pelo método de Kjeldahl, após a digestão sulfúrica da amostra. O fósforo por colorimetria do metavanadato-molibdato, e o enxofre por turbidimetria do sulfato de bário, a partir do extrato obtido por digestão nitro-perclórica. Os teores de cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco foram determinados por espectroscopia de absorção atômica no Espectrômetro Agilent, modelo 55B.

4.3 ESTUDO DAS PROPRIEDADES HIDROFÍLICAS DA CASCA

As propriedades hidrofílicas da casca CD foram avaliadas pelo grau de intumescimento (Q %) em função do tempo. Para a avaliação do intumescimento e do ciclo de reidratação, as cascas previamente secas foram pesadas em uma balança analítica, apresentando massa média de aproximadamente 25 mg por amostra. Em seguida, as amostras foram colocadas para intumescer em frascos flaconetes de vidro contendo 10 mL de água deionizada e mantidas em temperatura ambiente. Em intervalos de 3, 6, 12, 24 e 48 h após o início do processo, as amostras foram retiradas do meio aquoso, dispostas sobre papel filtro para remoção da umidade superficial e pesadas. Ao final do ciclo de 48 h, as amostras foram secas em estufa a 60 °C por 15 h, pesadas e novamente utilizadas para o início de um novo ciclo de hidratação. O processo de reidratação foi realizado cinco vezes, utilizando amostras em triplicata.

O grau de intumescimento foi determinado por gravimetria, conforme metodologia adaptada de (Rebelo et al., 2025), calculado a partir da Equação (1):

$$Q(\%) = \frac{\mathrm{M_t - M_0}}{M_0} \times 100 \qquad (1)$$

em que M_t é a massa da casca intumescida em um determinado tempo t e M_0 é a massa seca inicial.

Para investigar o comportamento da casca da pitaia ao longo dos ciclos de hidratação-secagem-reidratação, a perda de massa seca foi calculada a partir da Equação (2):

$$Perda\ de\ massa\ (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde M_i indica a massa inicial da casca e M_f, a massa seca antes da imersão em água e do início de um novo ciclo de hidratação. Dessa maneira, nesse estudo a variação de massa foi determinada em relação ao ciclo imediatamente anterior

A avaliação das propriedades hidrofílicas através do grau de intumescimento também foi analisada para as amostras em solução de enriquecimento de sulfato de amônio, seguindo os mesmos procedimentos realizados em água deionizada. O preparo da solução de enriquecimento está descrito no item 4.4.

4.4 PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO COM SULFATO DE AMÔNIO

A definição da concentração de sulfato de amônio para o enriquecimento foi adaptada dos procedimentos descritos por Bortolin et al. (2012). Em todo processo de enriquecimento desse trabalho foi utilizada uma solução de 1710 mg/L de sulfato de amônio ($(NH_4)_2SO_4$), preparada em água deionizada. Inicialmente foi analisado o processo de cinética de enriquecimento, sendo determinado o tempo máximo de enriquecimento. Em seguida, foram analisadas as alterações químicas, estruturais e morfológicas decorrentes desse processo.

4.4.1 Cinética de enriquecimento

Inicialmente, para compreender a cinética do processo de enriquecimento, ou seja, o tempo máximo necessário para a máxima absorção de íons pela amostra, foram realizadas medições de condutimetria em função do tempo. Nessa etapa, amostras de CN e CD secas de massas aproximadas de 0,01 g foram adicionadas em frascos do tipo flaconetes contendo 10 mL da solução de 1710 mg/L de $(NH_4)_2SO_4$. Em seguida, foram realizadas medidas de condutividade elétrica da solução em intervalos de tempo de imersão entre 3 e 72 horas, utilizando o medidor de condutividade CD-20 DIGIMED. A célula de condutividade de platina foi calibrada com cloreto de potássio (KCl) em concentração de 0,01 mol/L a 25 °C, com condutividade padrão de 1,40 mS/cm.

Medidas de condutividade elétrica para as cascas CN e CD em água deionizada (na ausência de $(NH_4)_2SO_4$) também foram analisadas como controle. As análises foram realizadas para nove amostras de CN e CD em solução de $(NH_4)_2SO_4$ e para 3 amostras em água deionizada.

4.4.2 Enriquecimento

Para o estudo da adsorção dos íons amônio (NH_4^+), aproximadamente 2 g das cascas CN e CD foram adicionadas a frascos de Erlenmeyer contendo 100 mL da solução de $(NH_4)_2SO_4$. Os frascos foram mantidos sob agitação em mesa agitadora orbital por um período total de 48 h, em temperatura ambiente (Figura 3). Em seguida, as amostras foram retiradas do meio de adsorção e secas em estufa a 60 °C por 15 h para posterior utilização nas análises. O tempo de 48 h foi determinado através das medidas de condutimetria, conforme discutido na seção 4.4.1. As amostras enriquecidas foram nomeadas como CN+$(NH_4)_2SO_4$ e CD+$(NH_4)_2SO_4$

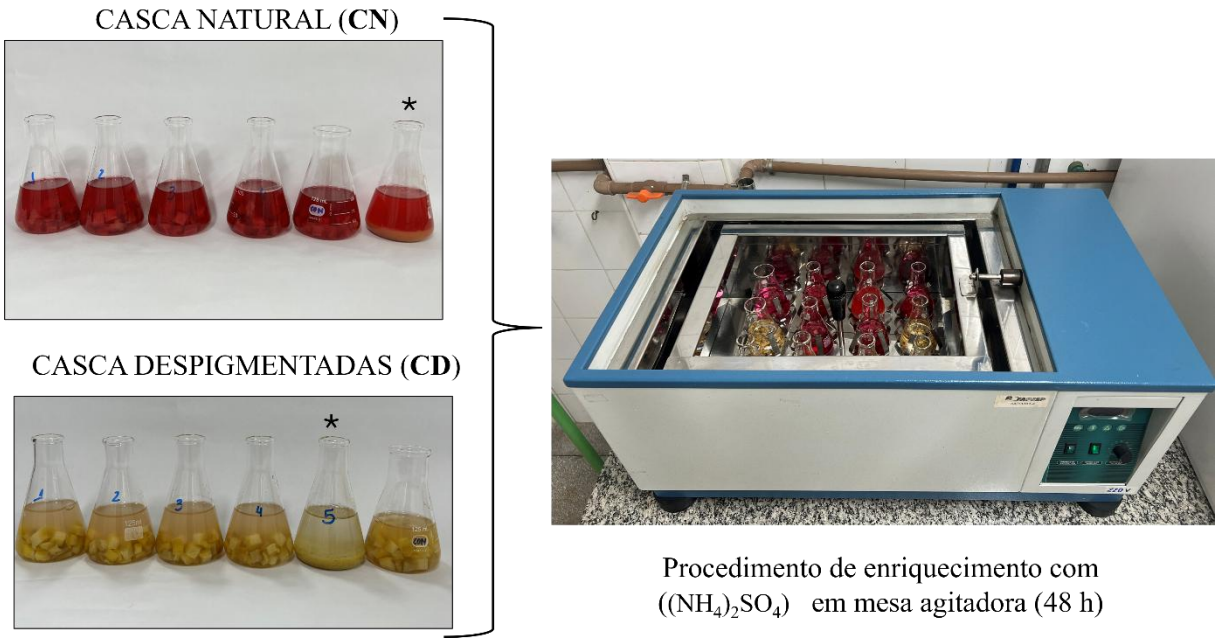


Figura 3 – Representação do ensaio de enriquecimento da casca de pitaia natural (CN) e despigmentada (CD). *As amostras moídas foram utilizadas para comparação do processo de enriquecimento.

4.4.3 Caracterização do processo de enriquecimento

Após o processo de enriquecimento, parte das cascas (CD e CN) foram separadas para caracterização por MEV, FTIR, TG e teores de macro e micronutrientes. O processo de preparação das amostras para as análises ocorreu conforme descrito na seção 4.2.2.

4.5 LIBERAÇÃO DE ÍONS NH_4^+

4.5.1 Monitoramento da liberação iônica por condutimetria

No estudo de liberação, aproximadamente 2 g de amostras da CD previamente enriquecidas com íons NH_4^+, foram imersas em 100 mL de água deionizada (pH 8), deixadas em agitação orbital (Figura 4). Inicialmente, a cinética de liberação foi acompanhada por medidas de condutimetria em função do tempo. A condutividade elétrica da solução foi medida em diferentes intervalos de tempo entre 30 min e 48 h após a imersão das amostras em água. Amostras de CD não enriquecidas foram utilizadas como controle em todas as medidas realizadas na etapa de liberação.



Figura 4 – Representação das etapas de preparo, imersão e análise de condutimetria da casca da despigmentada (CD).

O processo de liberação também foi realizado em diferentes condições de pH. Nesta etapa, as amostras enriquecidas foram colocadas em água deionizada a pH 8, solução de HCl a pH 3 (meio ácido) e solução de NaOH a pH 10 (meio básico), as quais foram mantidas em agitação orbital por 48 h. A medida de condutividade da solução foi realizada apenas no início da imersão e somente após 48 h de liberação.

4.5.2 Caracterização do processo de liberação em água

Após a liberação em água deionizada a pH 8, as amostras foram caracterizadas por MEV, FTIR e por teores de macro e micronutrientes, seguindo os mesmos procedimentos descritos na seção 4.2.2. Adicionalmente, as amostras de água utilizadas no processo de liberação em água deionizada, após 12, 24 e 48 h, também foram analisadas quanto aos teores de macro e micronutrientes. As análises de macro e micronutrientes também foram realizadas para as amostras utilizadas nos testes de liberação em pH ácido e alcalino. Para as análises de teor nutricional, as soluções de liberação foram armazenadas em frascos âmbar sob refrigeração a 8 °C até o momento da análise. Análises da água deionizada utilizada nos testes também foram analisadas como controle.

4.6 ESTUDO DA APLICAÇÃO DA CASCA DA PITAIA (CD) EM SOLO

Teste de biodegradabilidade das cascas

O teste de biodegradabilidade foi avaliado pela perda de massa das cascas adicionadas diretamente ao solo. Amostras da casca de pitaia (CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$, previamente pesadas, foram adicionadas sobre 5 g de substrato em placas de Petri, e adicionados mais 5 g de substrato sobre as cascas. Assim, as amostras foram mantidas na profundidade de solo, sendo aproximadamente 4 cm da superfície. Em seguida, o substrato foi irrigado com 5 mL de água deionizada a cada dois dias, sendo as placas mantidas em temperatura controlada de 25º C (estudo conduzido em laboratório).

Após 15 e 30 dias, as amostras foram removidas do substrato, lavadas com água deionizada para remoção das impurezas superficiais e secas em estufa a 60 °C. Após secagem, a massa da casca após submersão no substrato foi medida, e a perda de massa foi determinada pela Equação (2):

$$Perda\ de\ massa\ (\%) = \frac{M_i - M_t}{M_i} \times 100 \qquad (2)$$

sendo M_i a massa inicial da casca antes da submersão no substrato e M_t a massa após a submersão no substrato.

Avaliação da influência da pitaia na manutenção da umidade do solo

A manutenção da umidade do solo ao longo do tempo foi investigada utilizando as amostras de CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$. Nesse estudo, 1,0 g de cada amostra foi misturada com 100 g de substrato em frascos plásticos de 200 mL, em seguida, foram adicionados aproximadamente 50 g de água deionizada. A massa do substrato úmido na ausência (controle) e na presença das amostras foi medida a cada dois dias, e a perda de massa relacionada com a manutenção da umidade do substrato. Todas as análises foram realizadas em triplicata e em laboratório com temperatura controlada de 25 °C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESPIGMENTAÇÃO

Durante o processo de corte e manuseio da pitaia foi possível observar a liberação de pigmentos presentes no tecido do fruto, principalmente em contato com água. Esse comportamento está associado principalmente à presença de betalaínas, pigmentos hidrossolúveis acumulados no vacúolo das células vegetais, especialmente nos tecidos epidérmicos e subepidérmicos do fruto (Aztatzi-Rugerio et al., 2019). Entre esses pigmentos, destacam-se as betacianinas, responsáveis pela coloração vermelho-violeta característica da pitaia de polpa vermelha (*Hylocereus polyrhizus*). Essas moléculas apresentam elevada polaridade e solubilidade em água, o que favorece sua difusão para o meio aquoso quando ocorre ruptura das estruturas celulares durante o processamento do fruto.

Além da elevada solubilidade, a estabilidade das betacianinas é influenciada por diversos fatores físico-químicos. Assim, condições como temperaturas superiores a aproximadamente 50 °C, exposição à luz, presença de oxigênio, variações de pH e interação com íons metálicos podem promover a degradação dessas moléculas por processos como hidrólise, oxidação e descarboxilação (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021; Herbach et al., 2006). Diante desses fatores, tornou-se necessário compreender de que forma a remoção dos pigmentos, por meio do aquecimento, pode ter influenciado as demais propriedades da casca.

5.1.1 Caracterização da morfologia da casca CN e CD.

Nas imagens de microscopia óptica (Figura 5) obtidas para as cascas ainda úmidas, é possível observar a alteração de coloração vermelha da CN para amarela da CD. Esse efeito pode ser atribuído ao processo de despigmentação a 100ºC, no qual ocorre a degradação das betacianinas e à formação de produtos amarelos, que podem incluir neobetacianinas, ácido betalâmico e betaxantinas (Herbach et al., 2006). Nas imagens ópticas também é possível observar as estruturas fibrosas presentes no interior da casca, rodeadas por regiões esponjosas, as quais apresentam maiores modificações após o processo de imersão em água.

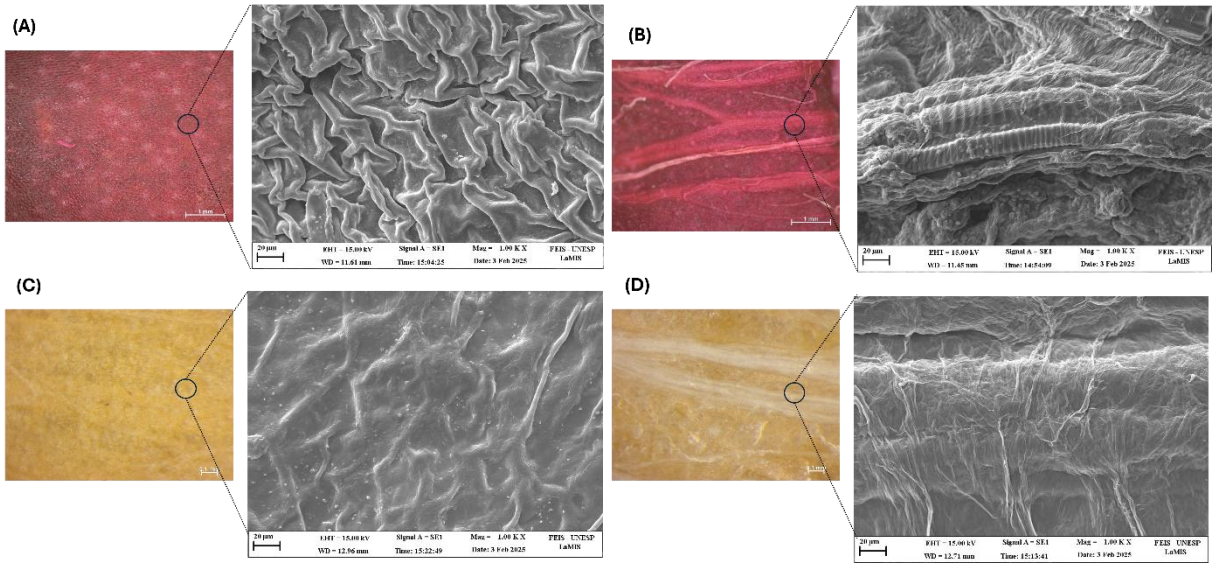


Figura 5 – Micrografias ópticas (escala de 1 mm) e imagens de MEV (escala de 20 µm) das regiões interna e externa da (A, B) casca da pitaia natural e da (C, D) casca despigmentada.

As imagens de MEV das CN revelaram estruturas irregulares bem definidas semelhantes a "escamadas" para a região externa (Figura 5 A), resultado do processo de secagem, conforme também observado por Yasmin et al. (2024), que relataram maior irregularidade estrutural em cascas secas por diferentes técnicas ao comparar com micrografias da casca fresca. No caso da região interna, identificaram-se regiões fibrosas características (Figura 5 B) típicas da espécie (*Hylocereus spp.*), conforme relatado por Priyantha et al. (2013).

Após o processo de despigmentação, foram observadas alterações quanto à morfologia externa da casca da pitaia (Figura 5 C) e um recobrimento maior das fibras presentes na parte interna (Figura 5 D), demonstrando que a estrutura das fibras se manteve sem a ocorrência de processos de degradação. Comportamento semelhantes foi descrito por Rahmati et al. (2019) onde intensidades mais moderadas de micro-ondas causaram recobrimentos superficiais das fibras, e intensidades mais elevadas (> 500 W) geraram degradação das fibras, diminuindo a capacidade de biossorção de íons de manganês.

As alterações decorrentes do processo de despigmentação foram permanentes mesmo após o processo de secagem, sugerindo que as alterações morfológicas na estrutura da casca da pitaia foram decorrentes do intumescimento e da temperatura. No entanto, a integridade das fibras é mantida, garantindo manutenção estrutural da matriz.

5.1.2 Caracterização estrutural em nível molecular

Para compreender os efeitos em nível molecular do processo de despigmentação, foram realizadas medidas de FTIR para CN e CD, conforme apresentado na Figura 6.

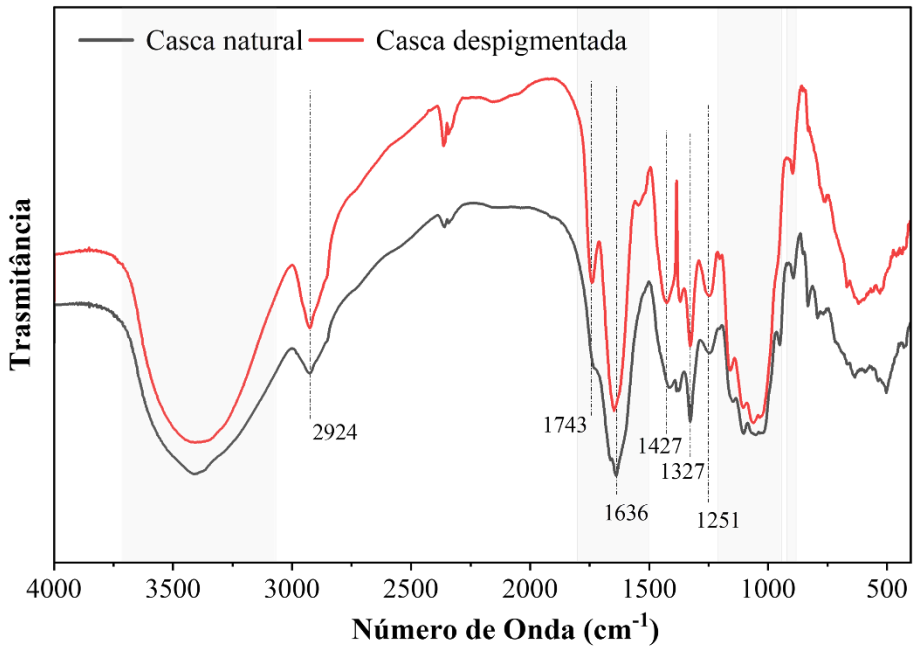


Figura 6 – Espectros de FTIR do pó da casca da pitaia natural (CN) e da casca após o processo de despigmentação (CD).

Nos espectros de FTIR (Figura 6) foi possível observar uma banda de absorção vibracional alargada na região de 3650–3000 cm^{-1}, atribuída ao estiramento das ligações O–H, característica de grupos hidroxila de polissacarídeos estruturais, em ambas as amostras (Taharuddin et al., 2023). No entanto, a CD apresentou maior alargamento e intensidade; esse comportamento pode ser associado à reorganização das ligações de hidrogênio na matriz polissacarídica em razão do processo de despigmentação em água quente. Alterações nessa região estão relacionadas à mudança na organização intermolecular e acessibilidade dos grupos hidroxilas (–OH) em pectinas e hemicelulose hidratadas, sem implicar degradação das cadeias principais, além de indicar a manutenção do caráter hidrofílico (Kacuráková, 2000). Além disso, a banda observada em 2924 cm^{-1}, atribuída ao estiramento C–H alifático de grupos $–CH_2$ e $–CH_3$ da estrutura da celulose e hemicelulose, não apresentou alteração significativa. Esse comportamento ressalta a presença de cadeias alifáticas dos polissacarídeos e a estabilidade da fração lignocelulósica da casca (Pelissari et al., 2014).

A banda em 1743 cm^{-1}, atribuída ao estiramento C=O de grupos ácido carboxílico ou ésteres, associado principalmente à estrutura da hemicelulose e lignina, apresentou maior

intensidade nos espectros da amostra CD. Adicionalmente, a presença da banda em 1636 cm^{-1}, associada ao grupo carbonila, confirma a presença da pectina em ambas as amostras (Listyarini et al., 2020). Para os espectros da CN, na região de 1600–1680 cm^{-1} observa-se sobreposição das bandas, sendo a vibração de estiramento das betalaínas C=N (1624 cm^{-1}) sobrepostas às bandas de vibrações do estiramento C=C do anel aromático da lignina, como também à banda de deformação da água adsorvida (Aztatzi-Rugerio et al., 2019).

A banda em 1427 cm^{-1} pode ser atribuída à deformação do grupo metileno CH_2, característica de estrutura da celulose, podendo também apresentar contribuições da estrutura de hemicelulose e lignina. Além disso, essa banda pode ser associada ao grau de cristalinidade ou organização das cadeias de celulose. Assim, as alterações observadas para a amostra de CD sugerem possíveis modificações estruturais ou conformacionais na matriz lignocelulósica.

As pequenas bandas em 1327 e 1251 cm^{-1} podem ser atribuídas às vibrações de C–O em ácidos carboxílicos, álcoois ou grupos éster, essas bandas foram também observadas por (Mendonça et al., 2024). Além disso, as bandas na região 1500–1800 cm^{-1}, associadas a grupos ácidos carboxílicos e ésteres da pectina, estão presentes em ambas as cascas; no entanto, foi observada redução da intensidade das bandas na amostra CD. Esse comportamento de redução para essa região pode estar relacionado à descarboxilação térmica das betacianinas, que resulta em perda dos grupos -COOH (Qin et al., 2020), confirmada também pela diminuição das bandas em 1200–900 cm^{-1} atribuídas a vibrações C–O e C–C, bem como em bandas próximas de 880–900 cm^{-1} associadas às estruturas aromáticas do cromóforo presentes nos pigmentos (Aztatzi-Rugerio et al., 2019).

Dessa forma, a análise em nível molecular por FTIR não evidencia degradação significativa das cadeias polissacarídicas no processo, uma vez que as características da matriz lignocelulósica foram preservadas, confirmando a manutenção da matriz, como observado pelas medidas de MEV. As alterações observadas foram principalmente atribuídas à degradação térmica das betacianinas e à modificação localizada dos grupos funcionais.

5.1.3 Difratometria de raios X

As condições de análise do pó da casca da pitaia (CN e CD) foram definidas com base na literatura, o que permitiu comparar o padrão cristalográfico da casca da pitaia da mesma espécie (*Hylocereus polyrhizus*). A Figura 7 evidencia os efeitos do processo de despigmentação sobre o arranjo estrutural do material, ou seja, em relação à distribuição das regiões amorfas e cristalinas.

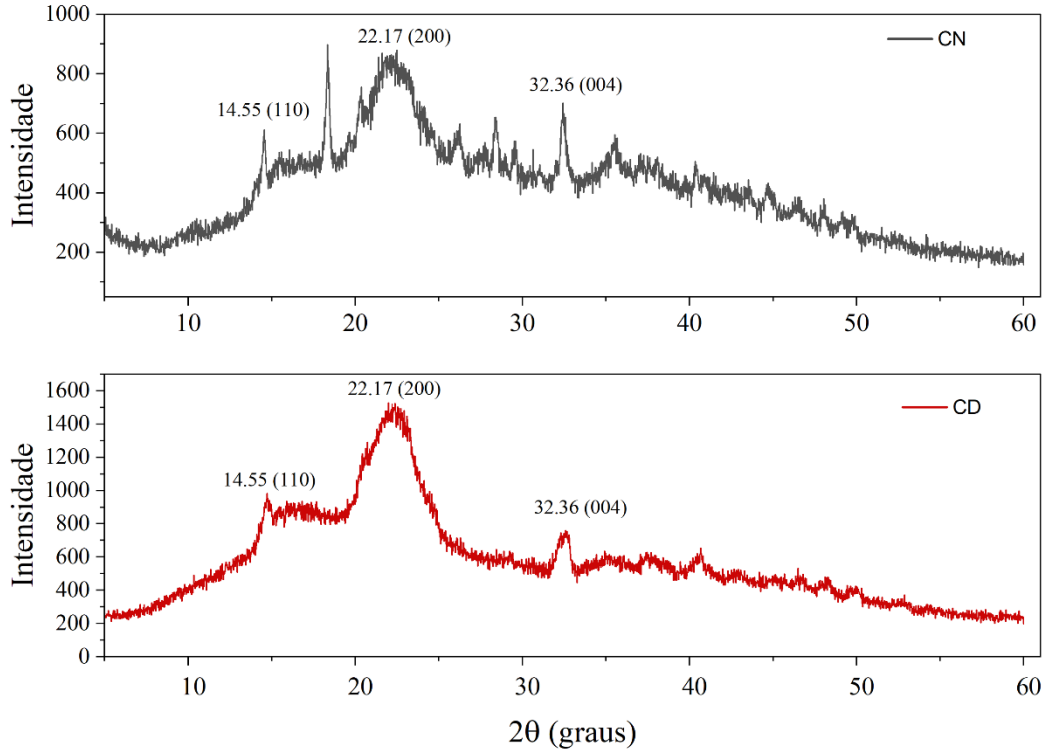


Figura 7 – Difratogramas de raios X obtidos para as amostras da casca da pitaia "*in natura*" (CN) e despigmentada (CD).

A estrutura dos biopolímeros presentes na casca é composta parcialmente por hemicelulose e lignina, que apresentam caráter predominantemente amorfo. Já no caso da celulose, há uma combinação de estruturas cristalinas e amorfas, as quais podem ser identificadas pelos picos nas regiões de 14,55°, 22,17° e 32,36°. A presença desses picos já foi observada anteriormente para a casca da pitaia, e estão associados à celulose tipo I (Hanan Taharuddin et al., 2023; Sanches et al., 2021). No entanto, durante o processo de despigmentação em água a 100 °C, possivelmente houve degradação e redistribuição da lignina e da hemicelulose. Esse efeito gera uma maior acessibilidade e exposição da celulose e pode ser observado principalmente pelo aumento da intensidade no pico de 22,17° (Deguchi et al., 2008) (Figura 7B).

A presença da estrutura cristalina confere um arranjo ordenado às cadeias da celulose, padrão que ocorre devido à presença de uma extensa rede de ligações de hidrogênio. Essas ligações também conferem resistência mecânica à fibra e tornam a celulose insolúvel na maioria dos solventes. Em contrapartida, as regiões amorfas são mais acessíveis e reativas, favorecendo a interação das cadeias com outras moléculas, contribuindo com o caráter hidrofílico da casca (Poletto et al., 2013). Dessa maneira, os resultados de DRX indicam que o processo de aquecimento promoveu reorganização estrutural e redução da contribuição amorfa. A fim de

analisar quais frações químicas foram preferencialmente removidas durante a despigmentação, as amostras CN e CD foram adicionalmente submetidas à análise termogravimétrica.

5.1.4 Análise Termogravimétrica

Através da técnica termogravimétrica (TG), foi possível observar diferenças nos eventos térmicos das amostras CN e CD, as quais podem associadas ao processo de despigmentação (Figura 8). Essas diferenças foram evidenciadas pelo comportamento da curva da DTG, indicando que a etapa de despigmentação promoveu alterações na estabilidade térmica das amostras, especialmente na faixa de temperaturas entre 200 ºC e 400 ºC.

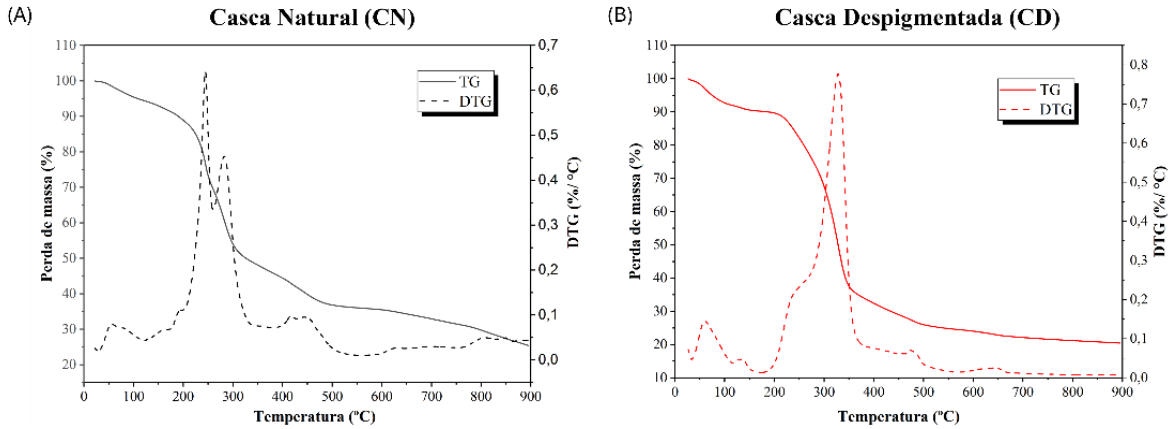


Figura 8 – Curvas termogravimétricas de TG e DTG obtidas para (A) casca natural (CN) e (B) casca despigmentada (CD).

Inicialmente, observa-se que ambas as amostras apresentam uma primeira etapa de perda de massa entre 30–150 °C, essa região está principalmente associada à remoção de água adsorvida e compostos voláteis presentes na matriz lignocelulósica. Nessa etapa, a amostra CD apresentou maior perda de massa, com redução em torno de 9%, enquanto a amostra de CN apresentou redução de aproximadamente 6%. Esse contraste pode ser observado principalmente pelo primeiro pico de evento térmico da curva DTG obtida para a amostra CD. Esse comportamento sugere maior retenção de água ou maior disponibilidade de grupos hidrofílicos após o processo de despigmentação, possivelmente devido à exposição de grupos hidroxila dos polissacarídeos estruturais, que aumentam a afinidade da matriz pela água, conforme abordado anteriormente por Hanan Taharuddin et al., (2023).

A segunda etapa de degradação térmica ocorre principalmente na faixa de 180 – 300 °C, a qual pode ser atribuída aos constituintes polissacarídicos, especialmente hemicelulose e pectina (Qian et al., 2022). Na amostra CN, os picos de degradação são mais evidentes, com

processos definidos em 245 e 283 ºC. No entanto, para a amostra CD, há uma diminuição do evento em 244 °C com aumento do evento de degradação em aproximadamente 325,65 °C. As alterações observadas na intensidade dos eventos térmicos indicam uma possível modificação na proporção dos componentes lignocelulósicos após o tratamento de despigmentação (Coelho et al., 2018). O aumento da taxa pode estar associado à maior exposição das cadeias polissacarídicas decorrente do tratamento, favorecendo a ruptura das ligações glicosídicas durante o aquecimento (Joseph Bassey et al., 2024).

Em temperaturas superiores a 300 °C, observa-se uma etapa de degradação lenta e contínua associada à decomposição da lignina, cuja estrutura aromática complexa resulta em maior estabilidade térmica. Nesse intervalo, a CN apresenta maior quantidade de resíduo carbonizado, enquanto a CD apresenta menor percentual de resíduo final, evidenciando uma diferença na fração de componentes termoestáveis entre as amostras. Assim, a maior formação de resíduo em CN indica maior presença de estruturas aromáticas e lignina, que favorecem a formação de carbono residual durante a pirólise. Por outro lado, a menor quantidade de resíduo em CD confirma a remoção parcial de componentes aromáticos, de acordo com a redução da fração amorfa observada nos difratogramas (Figura 8), reduzindo a estabilidade térmica da matriz lignocelulósica (Jimenez-Garcia et al., 2022).

De modo geral, os resultados de TG reforçaram que o tratamento de despigmentação atuou de forma seletiva e favorável sobre a matriz lignocelulósica, refletindo em mudanças na composição e organização estrutural, as quais foram evidenciadas pelas alterações na intensidade e distribuição das etapas de degradação térmica dos constituintes da casca da pitaia. Esse comportamento reflete uma reorganização estrutural, a qual também foi observada nos resultados de FTIR e DRX de CN e CD.

5.2 EFEITO DE INTUMESCIMENTO E CICLOS DE HIDRATAÇÃO

O grau de intumescimento é um parâmetro importante para a caracterização de materiais destinados à liberação controlada, uma vez que a absorção de água influencia diretamente a difusão de moléculas, a estabilidade estrutural e a cinética de liberação de compostos incorporados (Tariq et al., 2023). Assim, nesse trabalho foi analisado o grau de intumescimento em função do tempo e ao longo de sucessivos ciclos de hidratação-reidratação, com o intuito de compreender como esse efeito ocorre na casca da pitaia (íntegra), sem isolamento dos

polímeros naturais responsáveis pela retenção de água (hidrorretentores). A Figura 9 mostra imagens da casca CD antes e após o processo de intumescimento.

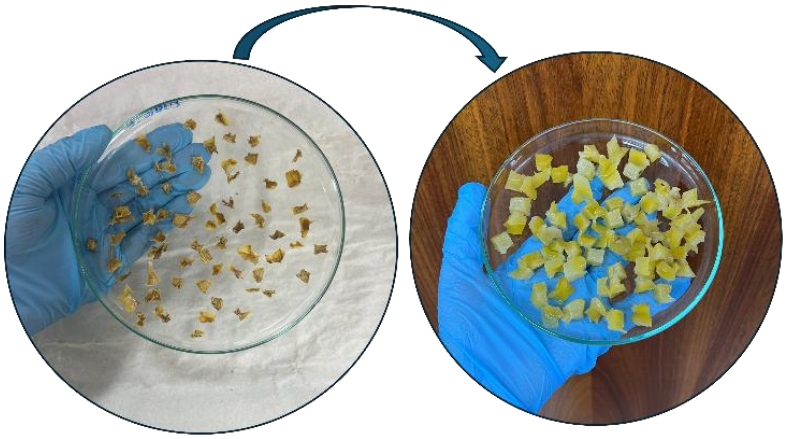


Figura 9 – Imagem da casca despigmentada (CD) seca e após a imersão em água.

A massa das amostras destinadas à avaliação dos ciclos de hidratação-reidratação foi determinada antes do início de cada ciclo conforme apresentado na Tabela 2. A perda de massa foi calculada utilizando a Equação (2), e observou-se que a variação máxima da massa ao longo dos ciclos foi de aproximadamente 6%.

Tabela 2 – Dados da massa média inicial da casca despigmentada (CD), perda de massa em porcentagem (%), médias da massa úmida ao final da imersão da casca em água e respectiva porcentagem de intumescimento total no final de cada ciclo.

Ciclos	Massa inicial (g)	Perda de massa (%)	Massa Úmida (g)	Intumescimento (%)
1º	0,0266±0,0006	0	0,3345±0,0567	1152±189
2º	0,0265±0,0008	0,5095±0,5886	0,3098±0,0707	1067±254
3º	0,0250±0,0008	5,6567±0,1717	0,3116±0,0739	1145±290
4º	0,0256±0,0005	-2,5582±1,3809	0,3152±0,0736	1127±282
5º	0,0269±0,0044	-4,6303±15,2212	0,3053±0,0729	1129±272

Em todos os ciclos foi observado um incremento exponencial do grau de intumescimento nas primeiras horas (Figura 10), seguido por uma tendência linear após 24 h, indicando a aproximação do estado de equilíbrio do processo de absorção de água. Também foi observado um perfil semelhante entre os ciclos e valores máximos próximos, o que evidencia a

manutenção da capacidade de intumescimento para CD mesmo em razão do processo de despigmentação e demonstra baixa degradação estrutural.

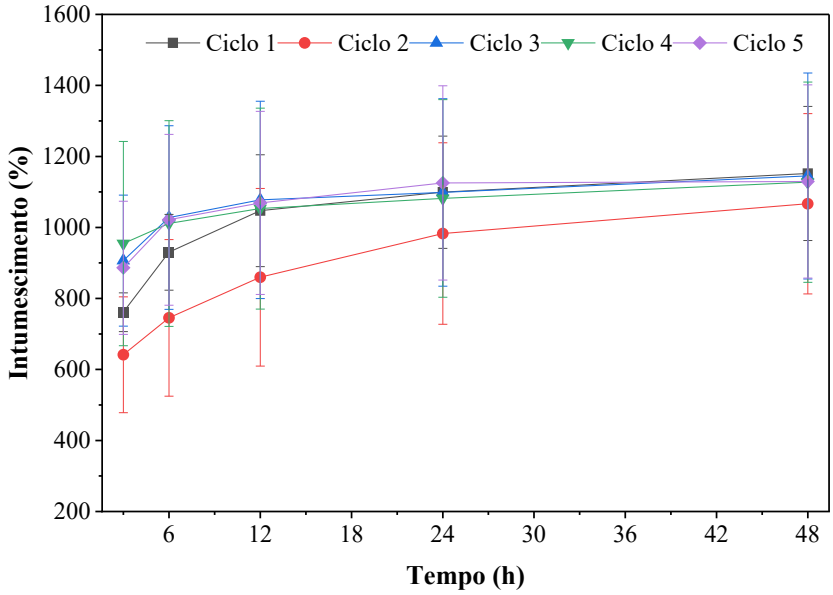


Figura 10 – Variação do grau de intumescimento da casca despigmentada (CD) ao longo do tempo obtido para cinco ciclos de hidratação-reidratação.

Os valores de intumescimento observados, entre 1030 e 1152% (Tabela 2), mesmo após sucessivos ciclos de hidratação-reidratação, demonstram a elevada capacidade de absorção de água e manutenção das propriedades hidrofílicas. Valores de intumescimento semelhantes foram reportados em estudos com hidrogéis à base de polímeros naturais e celulósicos aplicados em sistemas agrícolas e de retenção hídrica (Lv et al., 2019; Rebelo et al., 2025), demonstrando que a casca de pitaia apresenta propriedades hidrofílicas relevantes.

Os altos valores de desvios padrão em relação ao intumescimento (Tabela 2) podem ser atribuídos à heterogeneidade intrínseca da casca, influenciada pela composição de origem natural. Ainda assim, os valores médios mantiveram-se na ordem de grandeza em todos os ciclos. Esses resultados reforçam a estabilidade do material quando submetido a sucessivos processos de hidratação-reidratação e possibilitam condições de retenção de nutrientes. Além disso, o elevado grau de intumescimento favorece a expansão da matriz polissacarídica, gerando acessibilidade dos grupos hidrofílicos (Tariq et al., 2023).

5.3 ETAPA DE ENRIQUECIMENTO COM ÍONS AMÔNIO

5.3.1 Análises por condutimetria: cinética de enriquecimento e efeitos do pigmento

Inicialmente, na etapa de enriquecimento, foram realizadas medidas de condutividade em função do tempo para compreender o tempo máximo necessário para ocorrer a adsorção dos íons na casca de pitaia. A condutividade elétrica é diretamente relacionada à concentração e à mobilidade de espécies iônicas presentes na solução, sendo frequentemente utilizada como indicador indireto de processo de adsorção, troca iônica e liberação de íons durante a interação de materiais sólidos eletrolíticos (Joseph Bassey et al., 2024).

No estudo realizado, as amostras CN apresentaram naturalmente a liberação de pigmento em solução aquosa, de modo que as medidas de condutividade foram diretamente afetadas, apresentando um aumento em função do tempo, como apresentado na Figura 11. A variação da condutividade em função do tempo também foi observada para CD, porém com menores valores de condutividade inicial. Nesse caso, mesmo na ausência de pigmento em solução aquosa, a variação da condutividade pode estar relacionada com a liberação de espécies iônicas provenientes da matriz vegetal.

De fato, conforme descrito por Wink (1997), os pigmentos presentes na casca da pitaia, provenientes das betacianinas, contribuem para a liberação simultânea de diferentes espécies iônicas, incluindo ânions orgânicos dissociáveis ($-COO^-$) e cátions minerais, como K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+} que são naturalmente presentes no tecido vegetal. Esses íons liberados para a solução contribuem diretamente para o aumento da condutividade observado para ambas as amostras, sendo mais pronunciado para CN devido à maior presença de pigmentos e compostos solúveis.

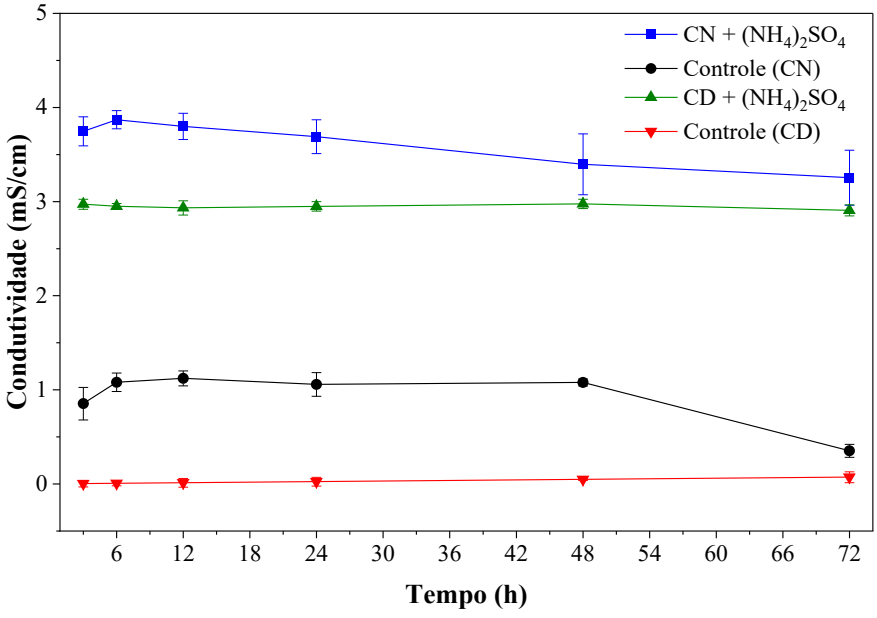


Figura 11 – Variação dos valores de condutividade das amostras casca natural (CN) e casca

despigmentada (CD) em água (controle) e na presença de $(NH_4)_2SO_4$, em função do tempo.

Os resultados de condutimetria sugerem que durante a etapa de enriquecimento ocorrem processos simultâneos de adsorção e troca iônica. Assim, nesse processo, íons amônio presentes na solução podem ser adsorvidos nos sítios ativos da casca, enquanto cátions previamente associados à estrutura são liberados para o meio líquido (Hu et al., 2020). Com isso, a condutividade observada ao longo do tempo resulta da contribuição conjunta desses fenômenos. Dessa forma, o tempo para os ensaios em maior escala foi determinado a partir da tendência ao equilíbrio, que foi observado após aproximadamente 48 h, com a indicação de saturação do meio. O enriquecimento em escala também foi monitorado por condutimetria, apresentando comportamento semelhante ao observado anteriormente. Após 48 h de enriquecimento, foram registrados valores de condutividade maiores para as amostras de CN (5,30±0,23 mS/cm) em relação as amostras de CD (3,68±0,21 mS/cm).

5.3.2 Análise dos teores de macro e micronutrientes antes e após enriquecimento

Os componentes nutricionais de diferentes espécies de pitaia têm sido amplamente explorados, especialmente para encontrar alternativas que viabilizem o uso da casca e aumentem a disponibilidade para diversas aplicações, como no desenvolvimento de alimentos funcionais (Jiang et al., 2021). No contexto do presente estudo, a análise dos teores de macro e micronutrientes foi investigada e é apresentada na Tabela 3. Os dados permitiram compreender os valores nutricionais (macro e micronutrientes) disponíveis por CN e os efeitos da despigmentação para CD e posteriormente quantificar o enriquecimento através do $(NH_4)_2SO_4$.

Tabela 3 – Teores de macro e micronutrientes da casca da pitaia natural (CN) e da casca da pitaia despigmentada (CD) após processo de enriquecimento com sulfato de amônio $(NH_4)_2SO_4$.

Amostras	**N (g/kg)**	**P** (g/kg)	**K** (g/kg)	**Ca** (g/kg)	**Mg** (g/kg)	**S** (g/kg)	**B** (mg/kg)	**C** (mg/kg)	**Fe** (mg/kg)	**Mn** (mg/kg)	**Zn** (mg/kg)
CN	**8,6**	0,5	7,2	7,7	2,3	**0,8**	21	34	60	30	28
CN + $(NH_4)_2SO_4$	**13,5**	0,5	4,2	12,7	2,4	**5,7**	40	38	85	37	45
CD	**8,5**	1,0	41	5,3	4,3	**0,6**	40	46	43	20	21
CD + $(NH_4)_2SO_4$	**13,7**	0,4	25	9,9	4,1	**6,3**	24	50	62	27	13

A CN apresentou valores elevados quanto ao teor de P, K, Ca, Mg e Fe, quando comparada a CN, esse resultado corrobora com análises prévias da composição mineral das espécies *H.polyrhizus* e *H.undatus*, evidenciando a presença natural de minerais na matriz (Nur et al., 2023). Neste estudo, os teores de macro e micronutrientes observados para as amostras despigmentadas, evidenciam alterações nos teores de P, K, Ca, Mg e micronutrientes, sugerindo uma concentração aparente desses elementos em decorrência do processo de despigmentação. Segundo o trabalho reportado por Wang; Howard (2018), a volatilização de compostos termolábeis da biomassa vegetal resulta em perda da massa global, elevando proporcionalmente a concentração dos constituintes inorgânicos termoestáveis remanescentes. Com base nesse efeito, o aumento dos teores pode estar atrelado não somente ao processo de despigmentação, mas também relacionado ao aumento da temperatura durante o processo.

Além disso, a remoção de água estrutural e voláteis promove reorganização da matriz porosa, conforme descrevem Yuan et al. (2025), o que pode facilitar a detecção e variação na disponibilidade desses minerais na estrutura remanescente de CD. Essas alterações, devido ao tratamento térmico, podem promover redistribuição ou concentração relativa dos minerais em função da redução da fração orgânica da amostra. Esse efeito pode ser observado pela relação de massa e volume observada para a amostra moída (Figura 12), sendo necessário, para a mesma massa, um volume maior de material.

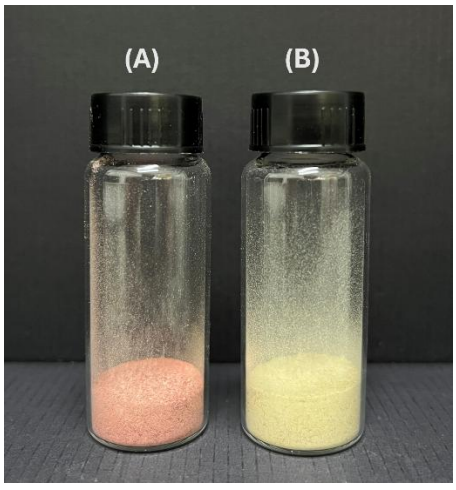


Figura 12 – Imagem obtida de aproximadamente 2 g das amostras processadas na forma de pó para (A) casca da pitaia natural (CN) e (B) da casca despigmentada (CD).

Ainda que o processo de despigmentação tenha resultado em efeitos sobre a concentração dos elementos, a quantidade de N e S foram as menos afetadas, sendo semelhantes para as amostras de CN e CD. Dessa forma, foi possível evidenciar que após o enriquecimento

com íons amônio, houve um aumento no teor de nitrogênio de 57% para CN+$(NH_4)_2SO_4$ e 61,2% em CD+$(NH_4)_2SO_4$. O aumento proporcional de S em relação a N também indica a adsorção dos íons sulfato durante o processo de enriquecimento. Esses resultados sugerem que a presença do pigmento não interfere diretamente no processo de enriquecimento dos íons provenientes do $(NH_4)_2SO_4$, mesmo ocorrendo maiores trocas iônicas durante o processo. No entanto, a despigmentação térmica devido ao efeito de concentração contribui para o aumento da concentração de P e K na matriz (Tabela 3), ampliando o potencial da casca de pitaia para a aplicação direta da casca para fertilidade do solo. Dessa forma, ao combinar a o teor de N promovido pelo enriquecimento com $(NH_4)_2SO_4$ com os demais teores remanescentes na casca despigmentada, obtém-se um insumo de com valor agregado, principalmente em relação aos nutrientes NPK.

5.3.3 Efeitos morfológicos, estruturais e térmicos após enriquecimento

As alterações morfológicas da casca da pitaia têm sido frequentemente investigadas no contexto de avaliação de técnicas para o processamento da casca (Chia & Chong, 2015) ou em estudos relacionados à extração da pectina, através das técnicas de utilização de diferentes intensidades de microondas (Rahmati et al., 2019). Esses estudos demonstram que diferentes condições de processamento podem provocar alterações significativas na superfície e na organização estrutural. Nesse contexto, a morfologia superficial das cascas enriquedas CN e CD foram investigadas, conforme apresentado na Figura 13. A partir dessa análise morfológica, observou-se novamente estruturas irregulares para a região externa, demonstrando uma característica permanente para a casca CN em relação a CD (Figuras 13) mesmo após a secagem. Vale ressaltar que o processo de enriquecimento das amostras é realizado em temperatura ambiente. Assim, as alterações observadas inicialmente na etapa de despigmentação (Figura 5) indicam que o processo térmico possui um papel significativo na alteração de morfologia externa, como pode ser observado na Figura 13 A.

Em relação à região interna da casca, observou-se maior perda das regiões irregulares e da rugosidade superficial. Além disso, verifica-se a alteração na integridade das fibras tanto em CN quanto em CD (Figuras 13 B e 13 D). Esse comportamento demonstra maior interação da região interna da casca com a água durante os processos de enriquecimento, onde há maior exposição de componentes hidrofílicos, como pectina e hemicelulose, cujos grupos funcionais polares favorecem a hidratação e interação com espécies iônicas presentes no meio (Voragen et al., 2009).

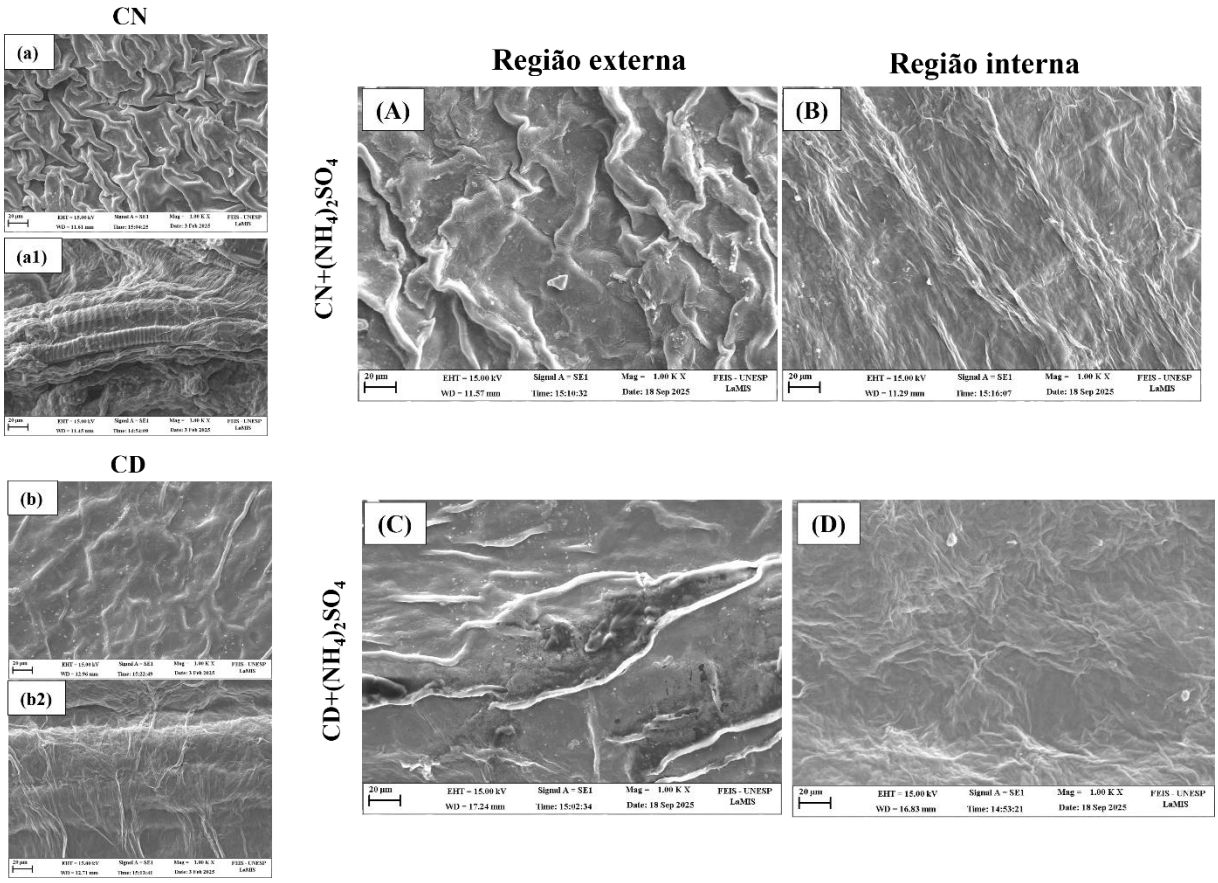


Figura 13 – Imagens de MEV das regiões externa (a e b) e interna (a1 e b1) das cascas CN e CD, e imagens em maior resolução das regiões externa (A e C) e interna (B e D) das cascas CN e CD após o processo de enriquecimento. Imagens com escala de 20 µm.

Os efeitos a nível molecular nas amostras CN e CD que passaram pela etapa de enriquecimento foram investigados por medidas de FTIR. Conforme os espectros apresentados na Figura 14, uma diferença entre as amostras antes e após o enriquecimento pode ser observada na região entre 3650 – 3000 cm^{-1} (Figura 14 A e B), a qual pode ser atribuída à incorporação de moléculas de água e à interação com os íons NH_4^+ através de ligações de hidrogênio. De fato, o alargamento na região 3650–3000 cm^{-1} pode estar relacionado à sobreposição das bandas de estiramento O–H e N–H, ou seja, vibrações de grupos hidroxila e vibrações adicionais devido à incorporação de íons amônio, resultando em sobreposição dessas bandas e no alargamento da região espectral (Stuart, 2004).

Além disso, a banda de baixa intensidade em 1743 cm^{-1}, a qual pode ser atribuída ao estiramento C=O presente na estrutura da pectina, hemicelulose e lignina, apresentaram uma diminuição de intensidade após o processo de enriquecimento. Essa diminuição pode estar relacionada aos processos de adsorção nos grupos funcionais presente na estrutura da casca da pitaia. Assim, apesar da redução de bandas, as cascas enriquecidas não demonstram degradação

total de pectina, mas a solubilização parcial e modificação química, levando à diminuição de grupos éster (C=O).

Modificações, mesmo que sutis, na banda em 1427 cm^{-1} observadas para as amostras enriquecidas (Figura 14c) também podem estar associadas à incorporação de íons amônio, uma vez que essa região espectral pode apresentar contribuições relacionadas a vibrações de deformação do grupo N–H. Além disso, a presença de grupos hidroxila abundantes na celulose e hemicelulose, bem como de grupos carboxílicos provenientes da pectina, favorece interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio com espécies amoniacais, o que pode provocar pequenas alterações na intensidade ou posição dessa banda no espectro, sugerindo a interação do nutriente com os constituintes da matriz lignocelulósica e indicando a possível retenção dessas espécies no material.

De forma específica, para as amostras CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$ (Figura 14b) foi observado um deslocamento das bandas na região de 1200 – 900 cm^{-1}, o que pode indicar a dissolução dos pigmentos durante o processo de enriquecimento, como observado e discutido no processo de despigmentação.

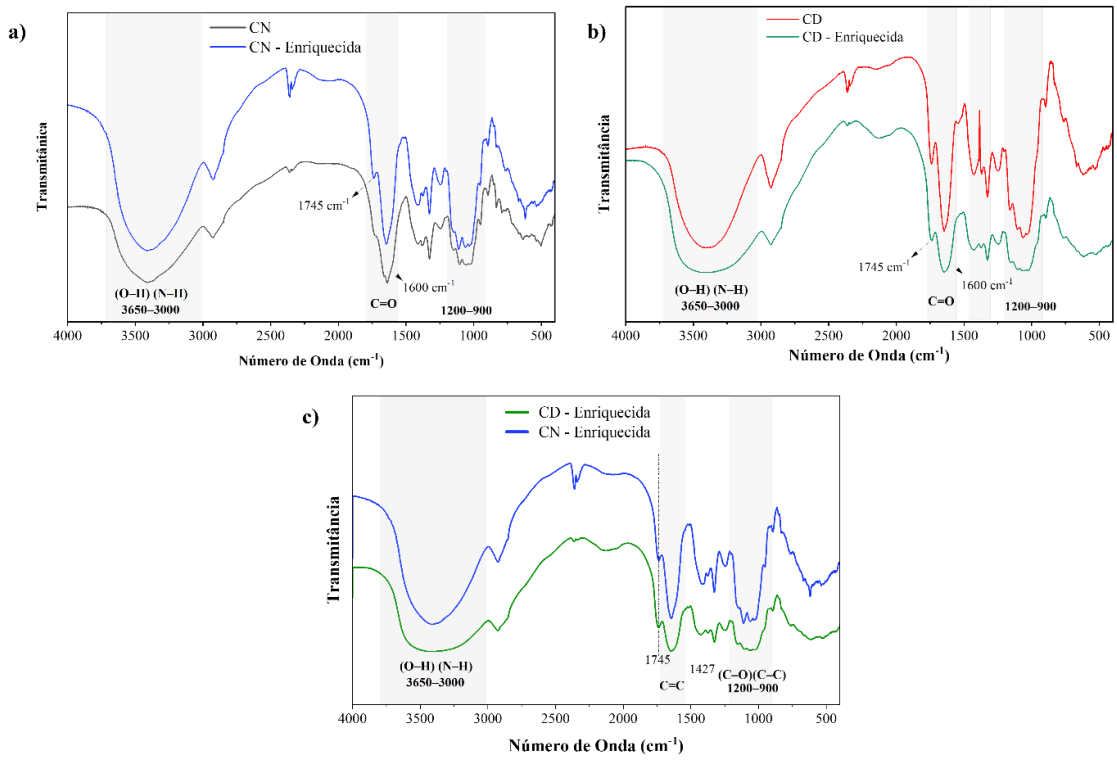


Figura 14 – Espectros de FTIR obtido para a cascas de (A) pitaia natural (CN) e (B) despigmentada (CD) antes e após o enriquecimento com sulfato de amônio. (C) Comparação dos espectros de FTIR obtidos para as amostras enriquecidas.

De modo geral, ambos os materiais apresentaram perfis de decomposição térmica semelhantes (Figura 15), com apenas o aumento da intensidade em 250ºC após o enriquecimento. O primeiro estágio térmico, localizado entre aproximadamente 32 °C e 115 °C pode ser atribuído à evaporação de água e à remoção de compostos voláteis. Nesse estágio, a perda de massa foi similar, com valores de aproximadamente 7,7% para CD (99,8 – 92,7 %) e 7,5% para CD+$(NH_4)_2SO_4$ (99,8 – 92,3), indicando que o processo de enriquecimento não alterou o comportamento térmico para a remoção de água.

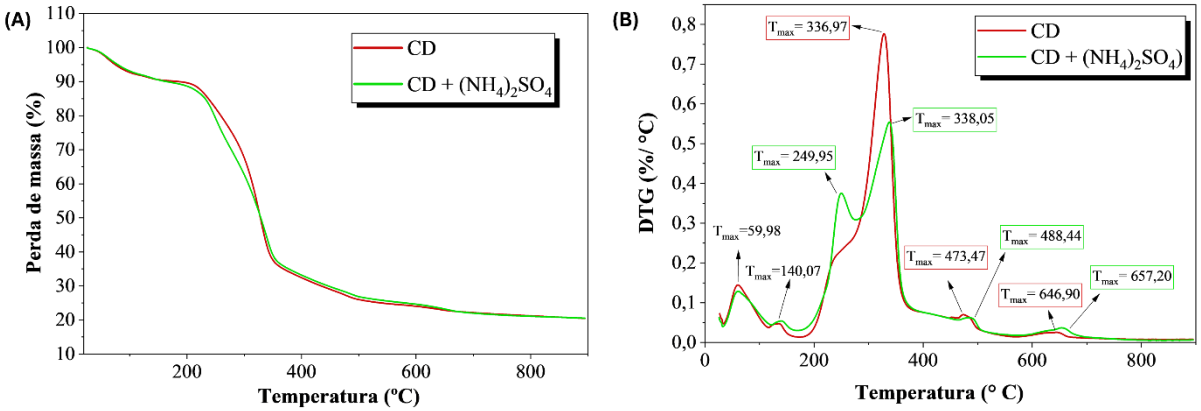


Figura 15 – (A) Curvas termogravimétricas de (A) TG e (B) DTG obtidos para as cascas despigmentada (CD) antes e após o processo de enriquecimento com $(NH_4)_2SO_4$.

No segundo estágio de variação de massa ocorreram alterações mais evidentes entre as amostras. Para a amostra CD, esses eventos térmicos ocorrem entre 200°C e 375°C, atribuídos à decomposição dos constituintes polissacarídicos da casca (Qian et al., 2022). Nesse intervalo, a casca CD apresentou 18,2% de perda de massa, enquanto a amostra enriquecida foi de 15,5%, ou seja, uma redução de 2,7%. Adicionalmente, o terceiro estágio de variação de massa ocorre entre 290 °C e 360 °C para a amostra enriquecida e refere-se à temperatura máxima de 338,5 °C, associada de forma predominante à decomposição da celulose (Wang & Howard, 2018). No entanto, nesse segundo estágio a curva da DTG evidencia o surgimento de um novo evento térmico em 249 °C, o qual pode estar relacionado à degradação do sulfato de amônio. Esse evento de degradação já foi reportado por Kaniewski et al. (2023), trabalho no qual a degradação do sulfato de amônio ocorre acima de 250 °C levando à formação de pirosulfato de amônio.

Dessa forma, foi possível identificar que o enriquecimento promoveu alterações quanto à degradação do material, promovendo um novo evento térmico devido à presença de íons amônio e sulfato na casca CD, como também a distribuição das etapas de degradação da

biomassa. Esse processo reflete as observações das caracterizações anteriores, quanto à organização estrutural e interações entre os constituintes da matriz lignocelulósica.

5.3.4 Efeito do enriquecimento nas propriedades hidrofílicas

As caracterizações da casca apresentadas nos tópicos anteriores promoveram alterações na proporção dos constituintes lignocelulósicos e morfológicos decorrentes do enriquecimento com íons amônio. As alterações de proporções dos biopolímeros, tais como a celulose, lignina, hemicelulose e pectina podem gerar alterações também no comportamento hidroretentor da casca. Assim, para avaliar o impacto do enriquecimento na capacidade de absorção de água foram realizados ensaios de intumescimento em água para as amostras enriquecidas, como apresentado na Figura 16.

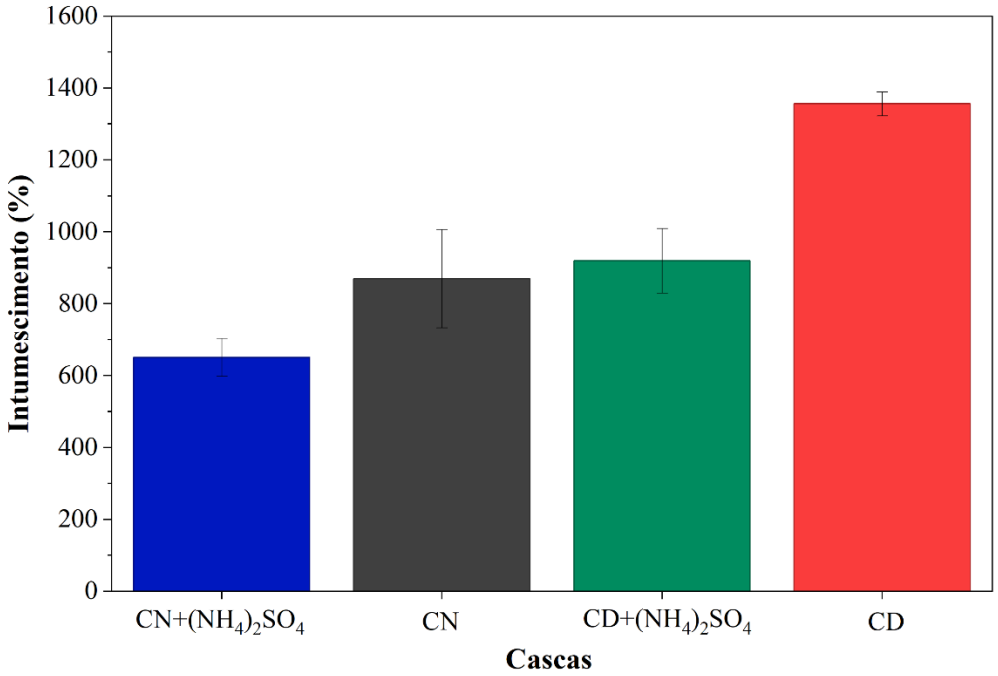


Figura 16 – Valores de intumescimento obtidos para as amostras da casca da pitaia naturais e enriquecidas com $(NH_4)_2SO_4$. Valores de intumescimento obtidos após 48 h de imersão em água deionizada.

As cascas enriquecidas com íons amônio apresentaram menor grau de intumescimento (< 1000%) em comparação às cascas não enriquecidas. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de sais, como o sulfato de amônio, que interfere nas interações entre o polímero e as moléculas de água. Como o intumescimento depende do grau de interação entre o solvente e o polímero, a presença desses sais pode reduzir a afinidade da matriz com a água, limitando sua expansão (Bortolin et al., 2012).

Outro aspecto em relação à diferença de intumescimento entre CN e CD está associado à presença das betalaínas; embora possuam grupos polares (ácido carboxílico), esses pigmentos possuem regiões aromáticas conjugadas, de caráter hidrofóbico, as quais favorecem interações intramoleculares e intermoleculares mais fortes dentro da própria matriz polimérica da casca. Com isso, a organização estrutural mais compacta reduz a disponibilidade de sítios livres para interação com moléculas de água (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021).

Por outro lado, os resultados obtidos para CD foram superiores à CN, reforçando o que foi observado anteriormente para a caracterização a nível molecular (5.1.2), em que se verificou aumento da intensidade na banda de ligações associadas aos grupos hidroxila (–OH). Esses resultados sugerem que o processo de despigmentação gera maior exposição de grupos hidrofílicos dos biopolímeros, favorecendo à absorção de água.

Assim, devido aos resultados observados também para os teores de macronutrientes, a utilização da casca CD se destaca como material promissor para liberação de nutrientes, além de seu elevado percentual de intumescimento favorecer a retenção de água.

5.4 LIBERAÇÃO DE ÍONS AMÔNIO EM ÁGUA

5.4.1 Análise por condutimetria do processo de liberação iônica em água

Em razão do efeito aprimorado em relação à quantidade de nutrientes NPK, as amostras de CD+$(NH_4)_2SO_4$ foram escolhidas para as análises de liberação em água. Inicialmente, com o intuito de monitorar o processo de liberação iônica em solução, medidas de condutividade foram realizadas durante o período de 48 h (Figura 17).

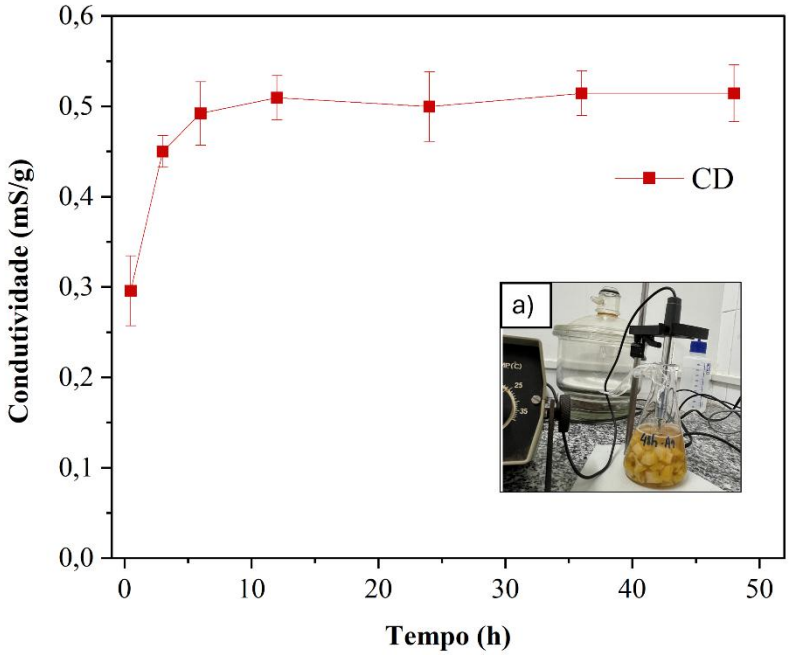


Figura 17 – Variação dos valores de condutividade durante o processo de liberação de íons em meio aquoso para amostras de casca despigmentada (CD) previamente enriquecidas, avaliada em 48 h. O *inset* (a) corresponde a foto das medidas de condutividade realizadas in situ durante o processo de liberação.

Durante o estudo cinético de liberação foi observado uma maior variação nos valores de condutividade durante as primeiras 6 h, sugerindo uma cinética de liberação rápida nas primeiras horas de imersão. Após 6 horas de liberação, os valores de condutividade apresentam liberação moderada, atingindo equilíbrio de liberação com 12h. Esse comportamento é consistente com sistemas de liberação controlada, onde nas primeiras horas sugere a liberação inicial das espécies iônicas fracamente adsorvidas ou localizadas na superfície da matriz lignocelulósica, seguidas por uma liberação mais lenta e controlada por difusão das espécies da matriz para a solução. A liberação rápida pode ser atribuída ao efeito "*burst release*", que corresponde à dissolução e difusão rápida de íons presentes na superfície ou em poros mais acessíveis do material (Bortolin et al., 2012). Na etapa lenta, os íons remanescentes encontram-se mais fortemente retidos à estrutura da matriz, e sua liberação depende principalmente da difusão através da matriz hidratada (Park et al., 2025).

Dessa forma, os resultados de condutimetria demonstram que a casca da pitaia atua como uma matriz de liberação controlada de nutrientes em meio aquoso, característica relevante para aplicações agrícolas. No caso particular dos íons amônio, a disponibilização gradual pode contribuir para a redução de perdas do nitrogênio no solo, uma vez que sua conversão em nitrito

e nitrato origina espécies solúveis e móveis, suscetíveis à lixiviação e ao escoamento superficial (Priya E. et al., 2024; Song et al., 2024)

5.4.2 Análise dos teores de nutrientes liberados em água deionizada

A Tabela 4 lista os teores de nutrientes obtidos para as amostras de CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$ que permaneceram na matriz (remanescentes) após os diferentes tempos de liberação e a Tabela 5 os valores determinados na água de liberação. A relação entre o nutriente liberado em água e o remanescente na casca foi analisada a partir de um balanço de massa entre as etapas de enriquecimento e liberação. Inicialmente, o enriquecimento promove a incorporação de íons amônio na matriz da casca, aumentando o teor de N e S em relação às amostras naturais (Tabela 4). Durante o ensaio de liberação em meio aquoso, parte dos íons é novamente transferida para a solução; esse processo foi observado principalmente para o N, que apresentou teor remanescente menor na casca após 48 h, enquanto na solução aquosa ocorreu aumento gradual da concentração de N de 1,5 para 2,7 mg/20 mL (Tabela 5). Esse comportamento indica a liberação progressiva dos íons amônio, o qual ressalta a atuação da casca como reservatório de nutrientes, possibilitando a liberação gradual (Trenkel, 2010).

Tabela 4 – Teores de macro e micronutrientes remanescentes nas cascas da pitaia despigmentada (CD) após estudo de liberação de íons de amônia em água deionizada, avaliados nos tempos de 12, 24 e 48 horas.

Tempo		Teores nutricionais presentes no pó da casca										
		N (g/kg)	**P** (g/kg)	**K** (g/kg)	**Ca** (g/kg)	**Mg** (g/kg)	**S** (g/kg)	**B** (mg/kg)	**C** (mg/kg)	**Fe** (mg/kg)	**Mn** (mg/kg)	**Zn** (mg/kg)
Teor Inicial	**CD + $(NH_4)_2SO_4$**	**13,7**	0,4	25	9,9	4,1	**6,3**	24	50	62	27	13
	Controle	8,5	1,0	41,8	5,3	4,5	0,6	40	46	43	20	21
12h	**CD + $(NH_4)_2SO_4$**	12,3	0,3	5,0	18,1	3,4	1,3	11,0	5,0	40,0	27,0	23,0
	Controle	8,8	0,4	14,4	13,5	3,9	0,3	14,0	9,0	32,0	30,0	16,0
24h	**CD + $(NH_4)_2SO_4$**	12	0,4	4,0	19,6	4,5	1,3	13,0	5,0	31,0	30,0	21,0
	Controle	8,4	0,4	13,2	11,3	4,5	0,3	14,0	10,0	46,0	28,0	15,0
48h	**CD + $(NH_4)_2SO_4$**	11,7	0,4	3,8	16	3,8	1,4	14,0	5,0	24,0	21,0	20,0
	Controle	9,2	0,4	15,5	12	5,1	0,3	17,0	31,0	45,0	37,0	31,0

Controle – Amostras de casca não enriquecidas.

Diferente do observado para os macronutrientes, os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn não apresentaram detecção mínima na solução aquosa, indicando que permaneceram

predominantemente retidos na casca (Tabela 5). Esse comportamento pode ser atribuído à menor mobilidade desses elementos em matrizes orgânicas e forte ligação desses elementos com grupos funcionais presentes nos constituintes lignocelulósicos da casca, favorecendo a retenção na fase sólida e reduzindo sua difusão em solução aquosa para o período de imersão do estudo (Tariq et al., 2023). No entanto, espera-se que a liberação em solo tenha efeitos melhorados atribuídos à liberação durante o processo de degradação da pitaia.

Tabela 5 – Análise dos teores de macro e micronutrientes presentes em água (CD) após estudo de liberação das cascas enriquecidas com íons amônia, avaliado nos tempos 12, 24 e 48 horas.

Tempo	Amostra	Teores nutricionais presente em água após estudo de liberação com as cascas (CD)						
		N (mg/20mL)	P (PPM)	K (PPM)	Ca (PPM)	Mg (PPM)	S (PPM)	B (PPM)
12h	CD + $(NH_4)_2SO_4$	1,50	5,35	87,40	1,70	5,45	112,45	0,45
	Controle	0,30	34,00	142,80	2,40	8,20	59,80	1,90
24h	CD + $(NH_4)_2SO_4$	1,70	4,65	83,35	2,10	5,75	121,05	0,45
	Controle	1,00	52,90	143,10	2,70	8,40	53,40	1,70
48h	CD + $(NH_4)_2SO_4$	2,70	8,20	86,10	1,95	5,80	114,35	0,65
	Controle	0,10	37,30	143,10	2,60	8,60	85,80	4,00

Controle – solução com amostras da casca não enriquecidas.

As análises dos teores nutricionais revelaram que ambas as cascas CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$, promoveram a liberação de nutrientes em meio aquoso. Contudo, as amostras de CD+$(NH_4)_2SO_4$ apresentaram maiores teores de nutrientes liberados, especialmente de N e S, em decorrência do processo de enriquecimento, como esperado. As análises ainda mostram que o processo ocorre de forma gradual, com maior liberação em 48 h. Porém, conforme já abordado pela literatura, os processos de liberação e enriquecimento de nutrientes podem ser otimizados através de ajustes quanto ao pH, uma vez que esse parâmetro interfere e à temperatura durante a liberação, os quais também impactam na diminuição da degradação da matriz (Priya E. et al., 2024).

5.4.3 Análise dos teores nutricionais liberados em diferentes condições de pH

A avaliação do pH em contexto de liberação de nutrientes tem sido bastante explorada, por se tratar de um parâmetro determinante para a eficiência da absorção radicular e da biodisponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal (Ferreira et al., 2015). Além disso, valores adequados de pH podem modular processos bioquímicos cruciais para a fertilidade e a solubilidade dos íons nos sítios de troca catiônica. Assim, o processo de liberação

foi realizado em diferentes valores de pH, e os valores de nutrientes foram analisados nas soluções e na casca após 48 h de liberação, como listados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. No entanto, os resultados foram mais bem observados para a casca após liberação, sendo destacados os teores de NPK na Figura 18.

Tabela 6 – Teores de macro e micronutrientes determinados na solução após 48h de liberação pela casca enriquecida (CD+$(NH_4)_2SO_4$) em diferentes valores de pH.

pH	Amostras	Teores nutricionais presente na solução após estudo de liberação (CD+$(NH_4)_2SO_4$)								
		N (mg/20mL)	P (PPM)	K (PPM)	Ca (PPM)	Mg (PPM)	S (PPM)	B (PPM)	Fe (PPM)	Mn (PPM)
3	CD+$(NH_4)_2SO_4$	N. D	0,3	1016,3	1,4	2,4	97,0	N. D	0,06	N. D
	CD	N. D	10,4	1012,5	1,4	2,5	32,9	N. D	0,09	0,05
8	CD+$(NH_4)_2SO_4$	2,70	8,20	86,10	1,95	5,80	114,35	0,65	N. D	N. D
	CD	0,10	37,30	143,10	2,60	8,60	85,80	4,00	N. D	N. D
10	CD+$(NH_4)_2SO_4$	N. D	0,06	1012,3	1,4	2,4	92,83	N. D	0,06	N. D
	CD	N. D	9	1011,3	2,5	2,5	27	N. D	0,09	N. D

N.D – Não detectável

Os valores dos teores de N remanescente na casca (Figura 18, Tabela 7) apresentaram valores muito semelhantes aos observados para o controle, sendo o teor na casca maior que os valores liberados. No entanto, comparando com os valores iniciais do teor de N, realizados no primeiro teste de liberação, em que se obteve o valor de 13,7 g/kg (Tabela 4), foi possível observar um comportamento de liberação maior para o menor pH neste estudo realizado. Esse efeito pode ser atribuído à possível protonação de grupos funcionais da superfície, favorecendo a liberação dos íons NH_4^+ (Aouada et al., 2008). Em contraste, em valores mais alcalinos ocorre a desprotonação dos grupos funcionais aumentando a densidade de cargas negativas, gerando maior interação do íon NH_4^+ com a matriz (Batista et al., 2018).

Tabela 7 – Teores de macro e micronutrientes determinados na casca enriquecida (CD+$(NH_4)_2SO_4$) após 48 h de liberação em diferentes valores de pH.

pH	Amostras	N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	S (g/kg)	B (mg/kg)	C (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
3	CD+$(NH_4)_2SO_4$	**10,1**	0,1	8,8	11,7	3,3	**0,9**	15,0	35,0	89,0	74,0	40,0
	CD	**11,5**	0,1	5,7	12,3	2,8	**1,1**	15,0	19,0	72,0	62,0	42,0
8	CD+$(NH_4)_2SO_4$	11,7	0,4	3,8	16	3,8	1,4	14,0	5,0	24,0	21,0	20,0
	CD	9,2	0,4	15,5	12	5,1	0,3	17,0	31,0	45,0	37,0	31,0
10	CD+$(NH_4)_2SO_4$	**12,1**	0,1	6,4	12,6	3,3	**1,2**	12,0	7,0	63,0	62,0	39,0
	CD	**8,7**	0,1	11,2	12,4	3,9	**0,3**	14,0	9,0	47,0	73,0	40,0

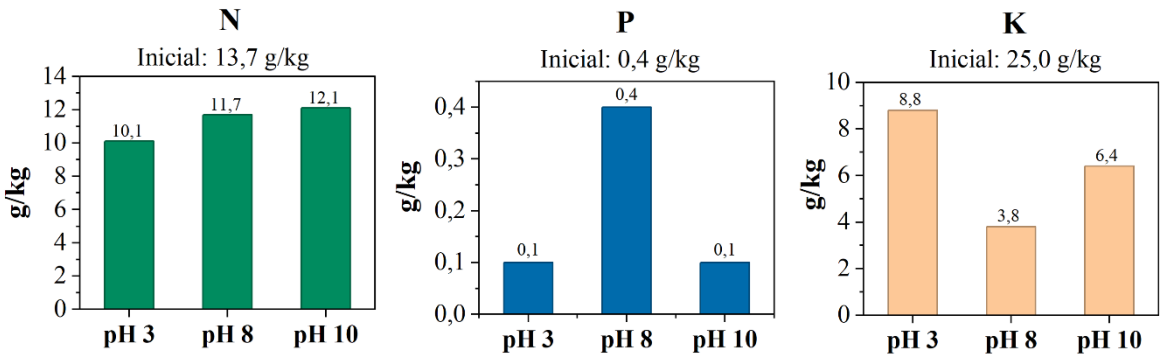


Figura 18 – Valores dos teores de macronutrientes (N, P e K) teor remanescente na CD + $(NH_4)_2SO_4$ após 48h de liberação em solução com valores de pH de 3,0; 8,0 e 10,0.

Os teores de P não apresentaram variação de liberação, mesmo após a alteração dos valores de pH, indicando a permanência na matriz como discutido anteriormente. Por outro lado, os valores de teor de K apresentaram maior liberação em pH alcalino, liberando aproximadamente 18,6 g/kg. De modo geral, o íon K^+ apresentou maior taxa de liberação em relação aos valores iniciais presentes na amostra enriquecida; esse comportamento revela a relação com a dinâmica fisiológica no tecido vegetal. O macronutriente K^+ apresenta uma liberação rápida a partir de resíduos vegetais, pois não desempenha função estrutural e não integra a estrutura química de compostos orgânicos estáveis na planta, permanecendo na forma iônica livre ou fracamente associado a cargas na solução celular (Havlin & Samuel L. Tisdale, 2016). Em geral, o mecanismo de liberação de macronutrientes é controlado pela taxa de penetração na rede tridimensional dos biopolímeros e pelo relaxamento macromolecular, esse comportamento é retratado principalmente em hidrogéis sintetizados com biopolímeros naturais (Chamorro et al., 2024).

Segundo reportado na literatura, a faixa ideal de pH no solo é aquela que transita gradativamente da neutralidade para a acidez (6,0 a 7,0), sendo essas as condições em que a planta consegue absorver os nutrientes com maior eficiência fisiológica (Batista et al., 2018; Havlin & Samuel L. Tisdale, 2016; Hu et al., 2020). Dessa forma, essa análise da liberação da casca em dependência do pH configura a casca como um biofertilizante de liberação gradual, sendo promissor para o manejo da fertilidade do solo. Por essa razão, o tópico seguinte avalia o comportamento da casca no contexto do solo, direcionando o comportamento do material e proporcionando a análise da viabilidade de diferentes contextos de enriquecimento do solo.

5.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CASCA DESPIGMENTADA (CD) EM SOLO

A CD apresentou baixa perda de massa após sucessivos ciclos de hidratação-reidratação, evidenciando estabilidade estrutural mesmo após repetidos processos de absorção. Entretanto, considerando seu potencial aplicação como matriz de liberação gradual de nutrientes, é necessário compreender seu comportamento de degradação e estabilidade em condições próximas ao ambiente de aplicação. Dessa forma, amostras CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$ foram avaliadas em substrato, visando investigar sua integridade estrutural e seu comportamento durante a aplicação em meio de cultivo comercial. As amostras foram adicionadas em substratos e mantidas sob condições de umidade e temperatura controlada. Após 15 e 30 dias de incubação, as massas das amostras foram determinadas com o intuito de avaliar sua estabilidade e possíveis perda de massa no meio de cultivo. A Tabela 8 apresenta a porcentagem da perda de massa ao longo do tempo.

Tabela 8 – Massa inicial, massa final e perda de massa da casca de pitaia (CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$) após teste de biodegradação em substrato de 15 e 30 dias de incubação.

Amostras	Após 15 dias			Após 30 dias		
	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de massa (%)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de massa (%)
CD	0,0219 ±0,0047	0,0232 ±0,0050	-5,6376 ±3,6492	0,0255 ±0,0024	0,0206 ±0,0037	18,2668 ±14,7364
CD+$(NH_4)_2SO_4$	0,0283 ±0,0175	0,0301 ±0,0162	-10,0039 ±9,2934	0,0251 ±0,0017	0,0249 ±0,0043	1,1587 ±2,3145

De forma visual, não houve variação expressiva em relação à morfologia das amostras, não sendo possível observar perda de massa decorrente de degradação. Os valores de massa obtidos também demonstram que durante o período de incubação de 15 e 30 dias há uma

adsorção de solo na amostra, ocasionando aumento da massa. Mesmo após a lavagem das amostras é possível observar partículas de solo na matriz, como observado pelas imagens de microscopia óptica (Figura 19).



Figura 19 – Imagens de câmera digital e microscópio óptico das amostras da casca da pitaia após 30 dias de incubação em substrato.

A capacidade de retenção de água no solo também foi avaliada na presença das amostras de CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$. Nessa análise, foi monitorada a variação de massa durante 30 dias, conforme apresentado na Figura 20. Observou-se elevada retenção de umidade durante todo o período, com valores superiores a 56% para todas as amostras. Nos primeiros dias de ensaio, o substrato contendo CD+$(NH_4)_2SO_4$ apresentou capacidade de retenção semelhante ao controle, sendo esses superiores ao observados somente para CD. Entretanto, após aproximadamente 15 dias, o substrato puro passou a apresentar os maiores valores de retenção de umidade. No entanto, ao longo de todo o período experimental, o substrato contendo CD+$(NH_4)_2SO_4$ manteve valores superiores aos observados para a casca pura (CD).

Com isso, demonstra-se que a presença da quantidade de 1 g de amostra da casca não compromete as propriedades hídricas do substrato, mas também não apresenta ganhos. Esse efeito pode estar relacionado ao tipo de solo utilizado, sendo o substrato comercial conhecido pelas suas propriedades de alta capacidade de retenção de água, e por isso é comumente utilizado como meio de produção de mudas, especialmente de hortaliças (Amici et al., 2020). Assim, estudos utilizando solos com menor capacidade de retenção de água tornam-se necessários para avaliar de forma mais precisa a contribuição da casca da pitaia para a manutenção da umidade e o desempenho do material em diferentes condições de cultivo.

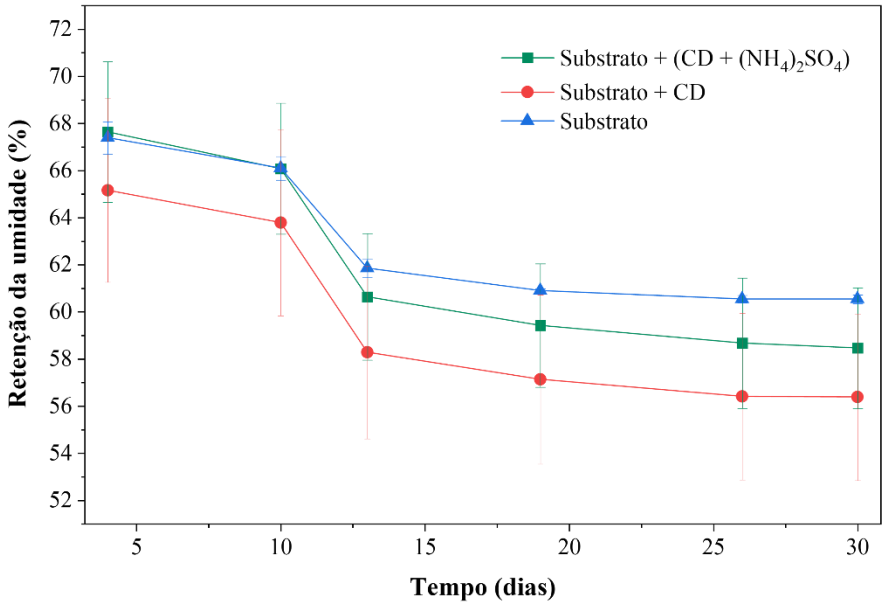


Figura 20 – Variação dos valores de retenção da umidade da casca de pitaia (CD e CD+$(NH_4)_2SO_4$) em função do tempo durante biodegradação em substrato

Além disso, ensaios de liberação em substrato também foram realizados. Entretanto, em virtude do tempo necessário para a conclusão das análises e interpretação dos resultados, esses dados não puderam ser incorporados à presente versão da dissertação.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que o processo de despigmentação promoveu alterações visuais e morfológicas associadas à degradação térmica das betacianinas presentes na casca. Por meio das análises estruturais, foi confirmada a preservação dos principais constituintes da matriz lignocelulósica, confirmada pelas medidas estruturais por FTIR e morfológicas por MEV. Além disso, os eventos térmicos indicaram alteração em relação à hemicelulose e aos compostos fenólicos.

A casca despigmentada apresentou elevado grau de intumescimento (superior a 1000 %) e estabilidade ao longo de sucessivos ciclos de hidratação-reidratação. Esse comportamento demonstra a capacidade de absorção de água da casca com mínima perda de massa, além de confirmar a eficiente retenção e disponibilidade de elementos minerais em sua estrutura.

Durante o processo de enriquecimento, foi observado que a interação entre a casca e a solução de sulfato de amônio envolve processos simultâneos de lixiviação de íons naturalmente presentes na matriz vegetal e adsorção de íons provenientes da solução enriquecedora. A incorporação desses íons foi confirmada pelo aumento dos teores de nitrogênio e enxofre na casca após o enriquecimento. Os estudos de liberação em meio aquoso indicaram que os nutrientes incorporados podem ser liberados gradualmente ao longo do tempo, atingindo um equilíbrio de liberação iônica em água em 12 h. As análises de macro- e micronutrientes realizadas após o processo de liberação demonstraram que a casca da pitaia pode atuar como reservatório natural de íons, liberando não somente o íon amônio enriquecido, mas também outros elementos essenciais como P e K.

Os estudos em substrato, indicaram baixa degradação da casca e um aumento da retenção hídrica das amostras CD+$(NH_4)_2SO_4$ em relação as cascas não enriquecidas. Essas características consolidam o uso sustentável da casca despigmentada da pitaia não apenas como um veículo de fornecimento gradual de nutrientes, mas também como um potencial condicionador para solos degradados ou com baixa capacidade de retenção de água. No entanto, estudos em solos com baixa capacidade de retenção de água e ensaios de liberação de nutrientes em condições reais de cultivo ainda são necessários para validar a eficiência e a aplicabilidade das amostras de CD+$(NH_4)_2SO_4$ como matrizes para liberação controlada de nutrientes.

De forma geral, os resultados demonstram o potencial uso da casca de pitaia como uma alternativa sustentável e uma matriz natural promissora como um adubo organomineral com capacidade de retenção de água e liberação gradual de nutrientes.

REFERÊNCIAS

Abbas, A., Wang, Z., Zhang, Y., Peng, P., & She, D. (2022). Lignin-based controlled release fertilizers: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *222*, 1801–1817. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.265

Amici, M. H., Raphael, J., De Castro, A., Francisco, M., Resende, V., Juscimar Da Silva, E. C., Moraes, Í., & Guedes, R. (2020). *Informações técnicas sobre substratos utilizados na produção de mudas de hortaliças*. www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Andrade, R. C., Ferreira Ribeiro, C. D., Caetano, V. C. de S., Fernandes, S. S., & Otero, D. M. (2024). Trends in dragon fruit peel compound extraction and technological applications. Em *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 153). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104721

Aouada, F. A., De Moura, M. R., Menezes. Eveline A., Nogueira, A. R. A., & Mattoso, L. H. C. (2008). *SÍNTESE DE HIDROGÉIS E CINÉTICA DE LIBERAÇÃO DE AMÔNIO E POTÁSSIO*.

Arivalagan, M., Karunakaran, G., Roy, T. K., Dinsha, M., Sindhu, B. C., Shilpashree, V. M., Satisha, G. C., & Shivashankara, K. S. (2021). Biochemical and nutritional characterization of dragon fruit (Hylocereus species). *Food Chemistry*, *353*. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.129426

Aztatzi-Rugerio, L., Granados-Balbuena, S. Y., Zainos-Cuapio, Y., Ocaranza-Sánchez, E., & Rojas-López, M. (2019). Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, *56*(8), 3677–3686. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03826-2

Bakar, J., ShuC., E., Muhammad, S. K. S., Hashim, D. M., & Noranizan, A. (2011). Physico-chemical characteristics of red pitaya (Hylocereus polyrhizus) peel. *international food research journal*, *18*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55276740

Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A. H., Mujtaba, M. A., Alghamdi, N. A., Wageh, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2020). Fundamental concepts of hydrogels: Synthesis, properties, and their applications. Em *Polymers* (Vol. 12, Número 11, p. 1–60). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/polym12112702

Batista, M. A., Inoue, T. T., Esper Neto, M., & Muniz, A. S. (2018). Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. Em *Hortaliças-fruto* (p. 113–162). EDUEM. https://doi.org/10.7476/9786586383010.0006

Bortolin, A., Aouada, F. A., De Moura, M. R., Ribeiro, C., Longo, E., & Mattoso, L. H. C. (2012). Application of polysaccharide hydrogels in adsorption and controlled-extended release of fertilizers processes. *Journal of Applied Polymer Science*, *123*(4), 2291–2298. https://doi.org/10.1002/app.34742

Brasil, Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. (2020). *Produção nacional de fertilizantes: Estudo estratégico*. Presidência da República.

Catoira, M. C., Fusaro, L., Di Francesco, D., Ramella, M., & Boccafoschi, F. (2019). Overview of natural hydrogels for regenerative medicine applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, *30*(10), 115. https://doi.org/10.1007/s10856-019-6318-7

Chamorro, A. F., Palencia, M., & Arrieta, Á. A. (2024). Development of High-Efficiency Fertilizer by Hydrogels Obtained from Cassava Starch and Citric Acid for Slow Release of Ammonium and Potassium. *Gels*, *10*(7). https://doi.org/10.3390/gels10070434

Chia, S. L., & Chong, G. H. (2015). Effect of Drum Drying on Physico-chemical Characteristics of Dragon Fruit Peel (Hylocereus polyrhizus). *International Journal of Food Engineering*, *11*(2), 285–293. https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0198

Coelho, E. M., de Azevêdo, L. C., Viana, A. C., Ramos, I. G., Gomes, R. G., Lima, M. dos S., & Umsza-Guez, M. A. (2018). Physico-chemical properties, rheology and degree of esterification of passion fruit (Passiflora edulis f. flavicarpa) peel flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*(1), 166–173. https://doi.org/10.1002/jsfa.8451

Deguchi, S., Tsujii, K., & Horikoshi, K. (2008). Crystalline-to-amorphous transformation of cellulose in hot and compressed water and its implications for hydrothermal conversion. *Green Chemistry*, *10*(2), 191–19. https://doi.org/10.1039/b713655b

Fathordoobady, F., Manap, M. Y., Selamat, & Singh, A. P. (2019). Development of supercritical fluid extraction for the recovery of betacyanins from red pitaya fruit (Hylocereus polyrhizus) peel: a source of natural red pigment with potential antioxidant properties. Em *International Food Research Journal* (Vol. 26, Número 3).

Ferreira, E. C., Gomes Neto, J. A., Milori, D. M. B. P., Ferreira, E. J., & Anzano, J. M. (2015). Laser-induced breakdown spectroscopy: Extending its application to soil pH measurements. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, *110*, 96–99. https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.06.002

Gonçalves, J. O., Leones, A. R., de Farias, B. S., da Silva, M. D., Jaeschke, D. P., Fernandes, S. S., Ribeiro, A. C., Cadaval, T. R. S., & Pinto, L. A. de A. (2025). A Comprehensive Review of Agricultural Residue-Derived Bioadsorbents for Emerging Contaminant Removal. Em *Water (Switzerland)* (Vol. 17, Número 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/w17142141

Govil, S., Van Duc Long, N., Escribà-Gelonch, M., & Hessel, V. (2024). Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Industrial Crops and Products*, *219*, 119160. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119160

Hanan Taharuddin, N., Jumaidin, R., Ridzuan Mansor, M., Asyadi Md Yusof, F., & Hanim Alamjuri, R. (2023). Characterization of Potential Cellulose from Hylocereus Polyrhizus (Dragon Fruit) peel: A Study on Physicochemical and Thermal Properties. *Journal of Renewable Materials*, *11*(1), 131–145. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.021528

Havlin, J. L. ., & Samuel L. Tisdale, W. L. N. J. D. Beaton. (2016). *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson India.

Herbach, K. M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Betalain stability and degradation - Structural and chromatic aspects. Em *Journal of Food Science* (Vol. 71, Número 4). https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x

Hu, X., Zhang, X., Ngo, H. H., Guo, W., Wen, H., Li, C., Zhang, Y., & Ma, C. (2020). Comparison study on the ammonium adsorption of the biochars derived from different kinds of fruit peel. *Science of the Total Environment*, *707*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135544

Jacqueline, P. J., & Velvizhi, G. (2024). Substantial physicochemical pretreatment and rapid delignification of lignocellulosic banana, pineapple and papaya fruit peels: A study on physical-chemical characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *37*. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101347

Jawad, A. H., Saud Abdulhameed, A., Wilson, L. D., Syed-Hassan, S. S. A., ALOthman, Z. A., & Rizwan Khan, M. (2021). High surface area and mesoporous activated carbon from KOH-activated dragon fruit peels for methylene blue dye adsorption: Optimization and mechanism study. Em *Chinese Journal of Chemical Engineering* (Vol. 32, p. 281–290). Materials China. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.070

Jiang, H., Zhang, W., Li, X., Shu, C., Jiang, W., & Cao, J. (2021). Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (Hylocereus spp.) peels: A comprehensive review. Em *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 116, p. 199–217). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.040

Jiaying, M., Tingting, C., Jie, L., Weimeng, F., Baohua, F., Guangyan, L., Hubo, L., Juncai, L., Zhihai, W., Longxing, T., & Guanfu, F. (2022). Functions of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Energy Status and Their Influences on Rice Growth and Development. *Rice Science*, *29*(2), 166–178. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005

Jimenez-Garcia, S. N., Garcia-Mier, L., Ramirez-Gomez, X. S., Aguirre-Becerra, H., Escobar-Ortiz, A., Contreras-Medina, L. M., Garcia-Trejo, J. F., & Feregrino-Perez, A. A. (2022). Pitahaya Peel: A By-Product with Great Phytochemical Potential, Biological Activity, and Functional Application. *Molecules*, *27*(16), 5339. https://doi.org/10.3390/molecules27165339

Joseph Bassey, E., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2024). Comparative elucidation of bioactive and antioxidant properties of red dragon fruit peel as affected by electromagnetic and conventional drying approaches. *Food Chemistry*, *439*. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138118

Kacuráková, M. (2000). FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers*, *43*(2), 195–203. https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00151-X

Kaniewski, M., Biegun, M., & Hoffmann, J. (2023). Thermal stability of systems containing ammonium nitrate and sulfate salts: an experimental study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *148*(23), 13051–13064. https://doi.org/10.1007/s10973-023-12328-5

Koehler, K. C., Anseth, K. S., & Bowman, C. N. (2013). Diels-alder mediated controlled release from a poly(ethylene glycol) based hydrogel. *Biomacromolecules*, *14*(2), 538–547. https://doi.org/10.1021/bm301789d

Le Bellec, F., Vaillant, F., & Imbert, E. (2006). Pitahaya (Hylocereus spp.): A new fruit crop, a market with a future. Em *Fruits* (Vol. 61, Número 4, p. 237–250). https://doi.org/10.1051/fruits:2006021

Listyarini, R. V., Susilawati, P. R., Nukung, E. N., & Yua, M. A. T. (2020). Bioplastic from Pectin of Dragon Fruit (Hylocereus polyrhizus) Peel. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, *23*(6), 203–208. https://doi.org/10.14710/jksa.23.6.203-208

Lv, Q., Wu, M., & Shen, Y. (2019). Enhanced swelling ratio and water retention capacity for novel super-absorbent hydrogel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *583*, 123972. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123972

Mendonça, A. C., Venceslau, A. de F. A., Ferreira, G. M. D., & Pinto, L. M. A. (2024). Red-fleshed pitaya peels (Hylocereus polyrhizus) as a biosorbent for removal of hormone 17α-methyltestosterone in aqueous medium. *Journal of Porous Materials*, *31*(3), 809–830. https://doi.org/10.1007/s10934-023-01543-y

Muhammad, N. W. F., Nurrulhidayah, A. F., Hamzah, M. S., Rashidi, O., & Rohman, A. (2020). Physicochemical properties of dragon fruit peel pectin and citrus peel pectin: A comparison. *Food Research*, *4*, 266–273. https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(S1).S14

Nur, M. A., Uddin, M. R., Uddin, M. J., Satter, M. A., & Amin, M. Z. (2023). Physiochemical and nutritional analysis of the two species of dragon fruits (Hylocereus sp.) cultivated in Bangladesh. *South African Journal of Botany*, *155*, 103–109. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.02.006

Pan, B., Lam, S. K., Mosier, A., Luo, Y., & Chen, D. (2016). Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *232*, 283–289. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019

Park, J., Guan, W., & Yu, G. (2025). Smart Hydrogels for Sustainable Agriculture. Em *EcoMat* (Vol. 7, Número 4). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/eom2.70011

Passos, C., Sampaio, J., Freitas, T., Fonseca, M., Santos, É., & Neves, R. (2023). PITAIA: A CACTÁCEA EM ASCENSÃO NO BRASIL. Em *Ciências Agrárias: limites e potencialidades em pesquisa - Volume 2* (p. 184–203). Editora Científica Digital. https://doi.org/10.37885/230713653

Pelissari, F. M., Sobral, P. J. D. A., & Menegalli, F. C. (2014). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from banana peels. *Cellulose*, *21*(1), 417–432. https://doi.org/10.1007/s10570-013-0138-6

Poletto, M., Pistor, V., & Zattera, A. J. (2013). Structural Characteristics and Thermal Properties of Native Cellulose. Em T. van de Ven & L. Godbout (Orgs.), *Cellulose - Fundamental Aspects* (2). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/50452

Priya, E., Sarkar, S., & Maji, P. K. (2024). A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(4), 113211. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.113211

Priyantha, N., Lim, L. B. L., Dahri, M. K., & Tennakoon, D. T. B. (2013). Dragon Fruit Skin as a Potential Low-Cost Biosorbent for the Removal of Manganese(II) Ions. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, *8*(3), 179–188.

Qian, S., Sheng, Z., Meng, Q., Chen, L., Wu, D., Tang, J., Liu, Y., Han, Z., & Hu, W. (2022). Evaluation of a Novel Phosphorylated Red Dragon Fruit Peel Pectin for Enhancement of

Thermal Stability and Functional Activity. *Plant Foods for Human Nutrition*, *77*(1), 150–154. https://doi.org/10.1007/s11130-022-00958-3

Qin, Y., Liu, Y., Zhang, X., & Liu, J. (2020). Development of active and intelligent packaging by incorporating betalains from red pitaya (Hylocereus polyrhizus) peel into starch/polyvinyl alcohol films. *Food Hydrocolloids*, *100*. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105410

Rahmati, S., Abdullah, A., & Kang, O. L. (2019). Effects of different microwave intensity on the extraction yield and physicochemical properties of pectin from dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) peels. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *18*. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2019.100186

Ramli, R. A. (2019). Slow release fertilizer hydrogels: a review. *Polymer Chemistry*, *10*(45), 6073–6090. https://doi.org/10.1039/C9PY01036J

Rather, R. A., Bhat, M. A., & Shalla, A. H. (2022). An insight into synthetic and physiological aspects of superabsorbent hydrogels based on carbohydrate type polymers for various applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *3*, 100202. https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2022.100202

Rebelo, R. C., Fonseca, A. C., Coelho, J. F. J., & Serra, A. C. (2025). A sustainable synthesis of cellulose hydrogels for agriculture with repurpose of solvent as fertilizer. *Carbohydrate Polymers*, *368*, 124156. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124156

Reyes-García, V., Botella-Martínez, C., Juárez-Trujillo, N., & Viuda-Martos, M. (2024). Pitahaya (Hylocereus ocamponis) peel flour as new ingredient in the development of beef burgers: impact on the quality parameters. *European Food Research and Technology*, *250*(9), 2375–2385. https://doi.org/10.1007/s00217-024-04545-5

Rizwan, M., Rubina Gilani, S., Iqbal Durani, A., & Naseem, S. (2021). Materials diversity of hydrogel: Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field. *Journal of Advanced Research*, *33*, 15–40. https://doi.org/10.1016/J.JARE.2021.03.007

Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2021). Biological properties and applications of betalains. Em *Molecules* (Vol. 26, Número 9). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/molecules26092520

Sanches, A. O., da Silva, M. J., Malmonge, L. F., Basso, N. R. S., & Malmonge, J. A. (2021). Tuning piezoelectric properties in elastomeric polyurethane nanocomposites utilizing cellulose nanocrystals. *Journal of Applied Polymer Science*, *138*(34). https://doi.org/10.1002/app.50865

Singh, S., Singh, R., Singh, K., Katoch, K., Zaeen, A. A., Birhan, D. A., Singh, A., Sandhu, H. S., Singh, H., & Sahrma, L. K. (2024). Smart fertilizer technologies: An environmental impact assessment for sustainable agriculture. *Smart Agricultural Technology*, *8*, 100504. https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2024.100504

Stuart, B. H. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Wiley. https://doi.org/10.1002/0470011149

Supare, K., & Mahanwar, P. (2022). Starch-Chitosan Hydrogels for the Controlled-Release of Herbicide in Agricultural Applications: A Study on the Effect of the Concentration of Raw Materials and Crosslinkers. *Journal of Polymers and the Environment*, *30*(6), 2448–2461. https://doi.org/10.1007/s10924-022-02379-4

Taharuddin, N. H., Jumaidin, R., Mansor, M. R., Hazrati, K. Z., Tarique, J., Asyraf, M. R. M., & Razman, M. R. (2023). Unlocking the Potential of Lignocellulosic Biomass Dragon Fruit (Hylocereus polyrhizus) in Bioplastics, Biocomposites and Various Commercial Applications. Em *Polymers* (Vol. 15, Número 12). MDPI. https://doi.org/10.3390/polym15122654

Taharuddin, N. H., Jumaidin, R., Mansor, M. R., Yusof, F. A. M., & Alamjuri, R. H. (2023). Characterization of Potential Cellulose from Hylocereus Polyrhizus (Dragon Fruit) peel: A Study on Physicochemical and Thermal Properties. *Journal of Renewable Materials*, *11*(1), 131–145. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.021528

Tariq, Z., Iqbal, D. N., Rizwan, M., Ahmad, M., Faheem, M., & Ahmed, M. (2023). Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. *RSC Advances*, *13*(35), 24731–24754. https://doi.org/10.1039/D3RA03472K

Tarte, I., Singh, A., Dar, A. H., Sharma, A., Altaf, A., & Sharma, P. (2023). Unfolding the potential of dragon fruit (Hylocereus spp.) for value addition: A review. Em *eFood* (Vol. 4, Número 2). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/efd2.76

Teixeira Filho, M. C. M., Buzetti, S., Andreotti, M., Benett, C. G. S., Arf, O., & de Sá, M. E. (2014). Wheat Nitrogen Fertilization Under no Till on the Low Altitude Brazilian Cerrado. *Journal of Plant Nutrition*, *37*(11), 1732–1748. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.889150

Trenkel, M. E. (2010). *Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture*. www.fertilizer.org

Utpott, M., Ramos de Araujo, R., Galarza Vargas, C., Nunes Paiva, A. R., Tischer, B., de Oliveira Rios, A., & Hickmann Flôres, S. (2020). Characterization and application of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus)* peel powder as a fat replacer in ice cream. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*(5). https://doi.org/10.1111/jfpp.14420

Voragen, A. G. J., Coenen, G. J., Verhoef, R. P., & Schols, H. A. (2009). Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Structural Chemistry*, *20*(2), 263–275. https://doi.org/10.1007/s11224-009-9442-z

Wang, P., & Howard, B. H. (2018). Impact of thermal pretreatment temperatures on woody biomass chemical composition, physical properties and microstructure. *Energies*, *11*(1). https://doi.org/10.3390/en11010025

Wattanakornsiri, A., Rattanawan, P., Sanmueng, T., Satchawan, S., Jamnongkan, T., & Phuengphai, P. (2022). Local fruit peel biosorbents for lead(II) and cadmium(II) ion removal from waste aqueous solution: A kinetic and equilibrium study. *South African Journal of Chemical Engineering*, *42*, 306–317. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.09.008

Wijaya, C. J., Saputra, S. N., Soetaredjo, F. E., Putro, J. N., Lin, C. X., Kurniawan, A., Ju, Y. H., & Ismadji, S. (2017). Cellulose nanocrystals from passion fruit peels waste as antibiotic drug carrier. *Carbohydrate Polymers*, *175*, 370–376. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.004

Xia, H., Wang, J., Riaz, M., Babar, S., Wang, X., Xia, X., Yan, B., Liu, B., & Jiang, C. (2025). Interaction between biochar and nitrogen fertilizer improves nitrogen utilization efficiency,

closely connected with rhizosphere microbes involved in nitrogen-cycling. *Soil and Tillage Research*, *254*, 106732. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2025.106732

Yang, M., Wu, J., Graham, G. M., Lin, J., & Huang, M. (2021). Hotspots, Frontiers, and Emerging Trends of Superabsorbent Polymer Research: A Comprehensive Review. Em *Frontiers in Chemistry* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fchem.2021.688127

Yasmin, A., Sumi, M. J., Akter, K., Rabbi, R. H. M., Almoallim, H. S., Ansari, M. J., Hossain, A., & Imran, S. (2024). Comparative analysis of nutrient composition and antioxidant activity in three dragon fruit cultivars. *PeerJ*, *12*(7). https://doi.org/10.7717/peerj.17719

Yuan, Y., Zhang, Q., Lin, S., & Li, J. (2025). Water: The soul of hydrogels. Em *Progress in Materials Science* (Vol. 148). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101378

Zaidel, D. N. A., Rashid, J. M., Hamidon, N. H., Salleh, L. M., & Kassim, A. S. M. (2017). Extraction and characterisation of pectin from dragon fruit (hylocereus polyrhizus) peels. *Chemical Engineering Transactions*, *56*, 805–810. https://doi.org/10.3303/CET1756135

Zhang, H., Xiao, L., Qin, S., Kuang, Z., Wan, M., Li, Z., & Li, L. (2024). Heterogeneity in Mechanical Properties of Plant Cell Walls. Em *Plants* (Vol. 13, Número 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/plants13243561