



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**POTENCIAL MULTIFUNCIONAL DA QUITOSANA EM FERTILIZANTES DE
LIBERAÇÃO CONTROLADA: SINERGIA ENTRE NUTRIÇÃO NITROGENADA,
BIOESTIMULAÇÃO E PROTEÇÃO ANTIMICROBIANA**

MARCO ANTÔNIO DE MAURO DAMASCENO

UBERLÂNDIA – MG

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**POTENCIAL MULTIFUNCIONAL DA QUITOSANA EM FERTILIZANTES DE
LIBERAÇÃO CONTROLADA: SINERGIA ENTRE NUTRIÇÃO NITROGENADA,
BIOESTIMULAÇÃO E PROTEÇÃO ANTIMICROBIANA**

MARCO ANTÔNIO DE MAURO DAMASCENO

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso
do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio
Malagoni

UBERLÂNDIA – MG

2026

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE MARCO ANTÔNIO DE MAURO
DAMASCENO APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM
20/03/2026.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

Orientador – FEQUI/UFU

Profa. Dra. Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros

FEQUI/UFU

Profa. Dra. Patrícia Angélica Vieira

FEQUI/UFU

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marco Antônio e Leandra, que foram os pilares fundamentais de toda essa jornada. Sem o apoio incondicional, o incentivo constante e os sacrifícios realizados para que eu pudesse me dedicar aos estudos, esta conquista não seria possível. Vocês me ensinaram que a educação é a maior herança que alguém pode receber e que a perseverança é o caminho para superar qualquer obstáculo. Minha gratidão por serem meu porto seguro e por acreditarem em mim em cada etapa.

À Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Química (FEQUI), por ter sido minha segunda casa durante estes anos. Agradeço pela excelência no ensino, pela infraestrutura e pelas inúmeras oportunidades de crescimento profissional e pessoal. Deixo minha gratidão aos professores e funcionários que, com dedicação e conhecimento, contribuíram para a minha formação como engenheiro e cidadão.

"Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé."

2 Timóteo 4:7

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização e problematização	1
1.2	Fertilizantes de liberação controlada e limitações atuais	2
1.3	Justificativa e abordagem proposta	2
1.4	Objetivos	3
2	METODOLOGIA	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1	Fertilizantes de liberação controlada (CRF)	6
3.1.1	Evolução tecnológica e contexto histórico	6
3.1.2	Diferenciação técnica: fertilizantes de liberação lenta versus fertilizantes de liberação controlada	7
3.1.3	Mecanismos físico-químicos de difusão e liberação	9
3.2	Quitosana: propriedades e processamento	11
3.2.1	Origem e ocorrência natural	11
3.2.2	A metamorfose química: o processo de desacetilação	12
3.2.3	Estrutura molecular, solubilidade e grupos funcionais	13
3.2.4	Versatilidade metodológica na produção de matrizes e filmes	14
3.3	Potencial multifuncional da quitosana na agricultura	16
3.3.1	Propriedades biocidas	16
3.3.2	Indução de resistência biótica	18
3.3.3	Indução de resistência a estresses abióticos	19
3.3.4	Estruturas da Quitosana na Simbiose com rizosfera	20
3.3.5	Atividade enzimática do solo	21
3.3.6	Atividade enzimática da planta	22
4	ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA QUITOSANA COMO AGENTE ESTRUTURANTE PARA FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA	24
4.1	Nutrição nitrogenada	24
4.1.1	Potencial bioestimulante e ganhos de biomassa: uma análise comparativa	24
4.2	Efeito antimicrobiano	27
4.2.1	Compilação da eficácia contra bactérias	27
4.2.2	Compilação da eficácia contra fungos	28
4.3	Respostas fisiológicas e bioquímicas à aplicação de quitosana	29

4.3.1	Influência enzimática na planta	29
4.3.2	Mitigação de estresse abiótico: respostas fisiológicas e bioquímicas	30
4.3.3	Efeitos na microbiota benéfica e atividades enzimáticas do solo	31
4.4	Considerações finais sobre a sinergia do uso da quitosana	33
5	CONCLUSÃO	35
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de difusão.	9
Figura 2 - Estrutura primária de (a) quitina e (b) quitosana.	11
Figura 3 - Ilustração das etapas de desestabilização da membrana bacteriana mediada pela ação policatiônica da quitosana.	17
Figura 4 - Parâmetros morfológicos e bioquímicos de desenvolvimento da couve-chinesa submetida a diferentes tratamentos de fertilização.	25
Figura 5 - Parâmetros fisiológicos e eficiência fotoquímica do fotossistema II em couve-chinesa sob diferentes tratamentos e dosagens de fertilização nitrogenada	30
Figura 6 - Dinâmica da atividade enzimática do solo sob diferentes sistemas de liberação de nitrogênio.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo técnico entre fertilizantes de liberação lenta (SRF) e fertilizantes de liberação controlada (CRF).	8
Tabela 2 - Efeitos de diferentes fontes e concentrações de fertilizantes nos parâmetros de massa fresca e seca da parte aérea (g).	26
Tabela 3 - Desempenho: matriz de quitosana versus ureia convencional.	27
Tabela 4 - Efeito da quitosana em tomateiros submetidos ao estresse salino.	31

RESUMO

A crescente pressão pela segurança alimentar global intensifica o uso de fertilizantes nitrogenados convencionais, como a ureia, cuja aplicação é marcada por baixa eficiência agrônômica e passivos ambientais severos, como a lixiviação de nitratos e a emissão de gases de efeito estufa. Embora os fertilizantes de liberação controlada (CRFs) busquem mitigar essas perdas, o uso de polímeros sintéticos em seus revestimentos gera o acúmulo de microplásticos nos ecossistemas, fenômeno conhecido como poluição branca. Este trabalho investiga o potencial tecnológico da quitosana como uma matriz biopolimérica multifuncional e biodegradável, analisando, por meio de uma revisão sistemática e compilação de estudos de caso, sua capacidade de integrar nutrição, bioestimulação e proteção fitossanitária. O texto detalha como o processo de desacetilação e a natureza policationica do biopolímero regulam a cinética de liberação de nitrogênio via difusão multiestágio e intumescimento, sincronizando a oferta nutricional com a demanda fisiológica das culturas. Os resultados compilados demonstraram ganhos de biomassa superiores a 264,26% no comprimento e 366,72% no diâmetro do caule em couve-chinesa, evidenciando que o uso dessas matrizes permite reduzir em 25% a carga de fertilizante mineral sem perda de produtividade. Os achados indicaram ainda um incremento de 469,21% nos teores de aminoácidos totais e de 103,51% em vitamina C, comprovando a otimização das rotas metabólicas vegetais. No âmbito fitossanitário, a quitosana alcançou 100% de inibição contra a bactéria *Bacillus cereus* e reduziu a mortalidade por *Fusarium oxysporum* em mais de 90%, atuando tanto por ação direta quanto como eliciador de resistência sistêmica. Na mitigação de estresses abióticos, o tratamento reduziu em até 51,52% a toxicidade por sódio em tomateiros sob salinidade, preservando o aparelho fotossintético. No solo, a diversidade bacteriana (índice de Shannon) elevou-se em 23,55%, com aumentos nas atividades das enzimas urease (46,54%) e fosfatase ácida (14,94%), consolidando um ambiente rizosférico mais resiliente. Conclui-se que a quitosana transcende a função de barreira física, consolidando-se como uma plataforma inteligente que alinha a alta produtividade aos princípios da química verde.

Palavras-chave: NUE, Eliciator, Química Verde, Poluição Branca, Rizosfera, Biopolímero.

ABSTRACT

The increasing pressure for global food security intensifies the use of conventional nitrogen fertilizers, such as urea, whose application is marked by low agronomic efficiency and severe environmental liabilities, such as nitrate leaching and greenhouse gas emissions. Although controlled-release fertilizers (CRFs) seek to mitigate these losses, the use of synthetic polymers in their coatings generates the accumulation of microplastics in ecosystems, a phenomenon known as white pollution. This work investigates the technological potential of chitosan as a multifunctional and biodegradable biopolymeric matrix, analyzing, through a systematic review and compilation of case studies, its ability to integrate nutrition, biostimulation, and phytosanitary protection. The text details how the deacetylation process and the polycationic nature of the biopolymer regulate nitrogen release kinetics via multi-stage diffusion and swelling, synchronizing the nutritional supply with the physiological demand of crops. The compiled results demonstrate biomass gains exceeding 264.26% in stem length and 366.72% in stem diameter in Chinese cabbage, evidencing that the use of these matrices allows for a 25% reduction in the mineral fertilizer load without loss of productivity. The findings further indicate an increment of 469.21% in total amino acid contents and 103.51% in Vitamin C, proving the optimization of plant metabolic pathways. In the phytosanitary scope, chitosan achieved 100% inhibition against the bacterium *Bacillus cereus* and reduced mortality from *Fusarium oxysporum* by more than 90%, acting both through direct action and as an elicitor of systemic resistance. In the mitigation of abiotic stresses, the treatment reduced sodium toxicity by up to 51.52% in tomato plants under salinity, preserving the photosynthetic apparatus. In the soil, bacterial diversity (Shannon index) increased by 23.55%, with increases in the activities of the enzymes urease (46.54%) and acid phosphatase (14.94%), consolidating a more resilient rhizospheric environment. It is concluded that chitosan transcends the function of a physical barrier, consolidating itself as an intelligent platform that aligns high productivity with the principles of green chemistry.

Keywords: NUE, Elicitor, Green Chemistry, White Pollution, Rhizosphere, Biopolymer.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e problematização

No cenário agrícola contemporâneo, a garantia da segurança alimentar global transformou-se em uma corrida contra o tempo devido ao rápido crescimento demográfico, que impõe uma pressão sem precedentes sobre a produção de alimentos para extrair o máximo rendimento das terras cultiváveis. Projeções atuais indicam que, para nutrir a população mundial em 2050, será necessário elevar a produtividade agrícola em cerca de 50% em comparação aos níveis de 2012, um desafio que coloca os insumos químicos, especialmente os compostos nitrogenados, no centro da estratégia de sobrevivência global, visto que o nitrogênio costuma ser o principal limitante do crescimento vegetal. Entretanto, essa busca por produtividade revelou um gargalo crítico no modelo vigente de fertilização: embora a ureia seja o fertilizante nitrogenado mais difundido devido à sua alta densidade de nutrientes e viabilidade econômica, sua aplicação convencional apresenta uma eficiência agrônômica criticamente baixa, com taxas de recuperação real pelas culturas situando-se frequentemente entre apenas 30% e 35% (EDDARAI et al., 2024; CAHYANINGRUM et al., 2024).

Essa falha ocorre pela falta de sincronização entre a liberação do nutriente e a capacidade de absorção radicular, uma vez que a rápida hidrólise da ureia no solo cria um excedente momentâneo de amônio que a planta não consegue assimilar integralmente. Esse desequilíbrio gera um prejuízo duplo: o desperdício econômico de recursos valiosos e a degradação ambiental severa decorrente de perdas por escoamento superficial, lixiviação e percolação. Tais processos culminam na volatilização de amônia (NH_3) e na lixiviação de nitrato (NO_3^-), que representam riscos à saúde pública e atuam como catalisadores para a eutrofização de ecossistemas aquáticos, devastando a biodiversidade local através do florescimento de algas e hipóxia. Além disso, a instabilidade da ureia favorece processos de desnitrificação que culminam na emissão de óxido nitroso (N_2O), um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global significativamente superior ao do dióxido de carbono, evidenciando que a solução reside no desenvolvimento de tecnologias de liberação controlada que respeitem o tempo da natureza (PEREIRA et al., 2015; HUANG et al., 2017).

1.2 Fertilizantes de liberação controlada e limitações atuais

Para mitigar os baixos índices de aproveitamento agrônômico e os danos ambientais, a engenharia química e de materiais tem concentrado esforços nos Fertilizantes de Liberação Controlada (CRFs), cujo objetivo central é utilizar barreiras de revestimento para ditar o ritmo de entrega dos nutrientes ao solo. Inicialmente, o setor utilizou polímeros sintéticos derivados do petróleo, como o polietileno, devido à sua durabilidade e viabilidade econômica; no entanto, esses materiais apresentam a falha crítica da falta de biodegradabilidade. O uso contínuo dessas coberturas gera um acúmulo progressivo de microplásticos na terra, fenômeno conhecido como poluição branca, que compromete a saúde do ecossistema, altera a microbiota e pode ingressar na cadeia alimentar. Portanto, é urgente a transição para revestimentos que sejam funcionais e, ao mesmo tempo, biodegradáveis, alinhando a inovação tecnológica aos pilares da química verde (TRENKEL, 2010; KASSEM et al., 2024; ZAHOOR et al., 2025).

1.3 Justificativa e abordagem proposta

Nesse contexto, a quitosana surge como uma alternativa biopolimérica de alto desempenho conectada aos princípios da economia circular, sendo produzida a partir da desacetilação da quitina, um resíduo abundante da indústria pesqueira como cascas de camarão e caranguejo. Diferente dos plásticos comuns, ela é biocompatível, biodegradável e funciona como um bioestimulante natural para o crescimento das plantas, possuindo uma arquitetura química rica em grupos amino e hidroxila que facilitam modificações estruturais para um ajuste fino na velocidade de liberação do nitrogênio. Isso garante que o nutriente seja disponibilizado de maneira gradual e em sincronia com o ciclo de desenvolvimento da cultura, deixando de ser vista como um mero revestimento inerte para se revelar como um componente inteligente e multifuncional (HARISH PRASHANTH; THARANATHAN, 2007; ZAHOOR et al., 2025).

A atuação da quitosana transcende a função de barreira física convencional, sendo impulsionada por uma bioatividade antimicrobiana intrínseca que nasce de sua natureza policatiônica, cuja carga positiva permite que o biopolímero interaja ativamente com as membranas celulares de microrganismos para inibir o desenvolvimento de fungos e bactérias fitopatogênicos. Simultaneamente, o biopolímero atua na modulação de sinais e na ativação de vias metabólicas e enzimáticas que vigoram o crescimento vegetal e fortalecem a defesa fitossanitária. Ao integrar, em uma única matriz, a entrega precisa da nutrição nitrogenada e uma

proteção robusta, essa dualidade funcional promove um salto na Eficiência do Uso de Nitrogênio (NUE), harmonizando a alta produtividade agrícola com as exigências contemporâneas de sustentabilidade e preservação ambiental (ZAHOOOR et al., 2025; NANDINI et al., 2025; CHUNG; CHEN, 2008).

1.4 Objetivos

Objetivo Geral

Abordar, mediante prospecção bibliográfica sistemática, o emprego da quitosana como matriz biopolimérica multifuncional em Fertilizantes de Liberação Controlada (CRFs), fundamentando as interações entre a cinética de liberação de nitrogênio, as propriedades bioestimulantes e a ação antimicrobiana do polímero, visando o incremento da Eficiência do Uso de Nitrogênio (NUE) e a sustentabilidade no campo.

Objetivos Específicos

- Mecanismos de Liberação: correlacionar o processo de desacetilação e a natureza policatiônica com a formação de matrizes que orquestram a difusão e o intumescimento.
- Desempenho Agrônomo: compilar dados comparativos de ganhos de biomassa em culturas como couve-chinesa, batata, milho e soja frente à ureia convencional.
- Proteção Fitossanitária: examinar a eficácia antimicrobiana direta e a atuação como eliciador de resistência sistêmica e tolerância a estresses.
- Ecologia da Rizosfera: investigar os impactos na microbiota benéfica e a modulação de enzimas edáficas essenciais (urease, fosfatase e catalase).
- Potencial Bioestimulante: Analisar a influência da quitosana no metabolismo fisiológico das culturas.

Para a consecução dos objetivos propostos, que visam mitigar os impactos ambientais e otimizar a eficiência do uso de nitrogênio, o presente trabalho encontra-se estruturado nos capítulos subsequentes de maneira interligada e progressiva. Inicialmente, o Capítulo 2 descreve a fundamentação metodológica da pesquisa, delineando-a como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e exploratória que utiliza bases de dados de alto impacto para selecionar a

literatura recente e estabelecer os critérios de elegibilidade responsáveis por embasar as discussões do estudo.

Em seguida, o Capítulo 3 dedica-se à fundamentação teórica, abordando desde a evolução tecnológica dos fertilizantes de liberação controlada (CRFs) e a imperativa transição para matrizes biodegradáveis, até o detalhamento das propriedades físico-químicas da quitosana decorrentes de seu processo de desacetilação e o seu amplo potencial multifuncional na agricultura, englobando propriedades biocidas, indução de resistência sistêmica e dinâmicas benéficas na rizosfera.

Dando prosseguimento, o Capítulo 4 compila e analisa os resultados práticos da aplicação da quitosana como agente estruturante, avaliando comparativamente o desempenho agronômico e o expressivo ganho de biomassa frente à ureia convencional, a eficácia antimicrobiana frente a fitopatógenos, bem como as respostas fisiológicas, a mitigação de estresses abióticos e a modulação enzimática favorável nas plantas e no solo.

Por fim, o Capítulo 5 encerra o trabalho ao reunir as conclusões que ratificam o biopolímero como uma plataforma inteligente vinculada à sustentabilidade e à química verde. Nesta mesma seção, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros, estabelecendo diretrizes estratégicas para o avanço das investigações na área.

2 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e exploratória, focada em investigar o uso da quitosana como uma matriz natural e multifuncional para fertilizantes. O objetivo principal foi reunir e analisar estudos que explicam como esse biopolímero atua na nutrição das plantas, no estímulo ao crescimento e na proteção contra doenças. A pesquisa buscou organizar as informações mais recentes para mostrar que a quitosana vai além de um simples revestimento, funcionando como uma ferramenta inteligente para a agricultura sustentável.

A busca por dados e informações científicas foi iniciada na plataforma ScienceDirect, escolhida por ser uma base de referência com artigos de alto impacto nas áreas de engenharia química e agronomia. A estratégia utilizada partiu da seleção de artigos de revisão e estudos de caso extremamente recentes, publicados entre os anos de 2021 e 2026. A partir da leitura desses textos, foi aplicada a técnica de rastreamento de referências, buscando os estudos citados por esses autores para encontrar experimentos fundamentais e dados complementares que explicam o comportamento da quitosana no sistema solo-planta.

Para garantir que os textos selecionados tivessem ligação direta com o tema, foram utilizadas palavras-chave estratégicas, como: Quitosana, CRFs (Fertilizantes de Liberação Controlada), NUE (Eficiência do Uso de Nitrogênio), Química Verde, Elicidor e Rizosfera. Esses termos foram essenciais para filtrar as pesquisas que discutem a redução das perdas de nutrientes e os benefícios ambientais.

Os critérios para a escolha definitiva dos artigos foram a atualidade e a presença de resultados práticos comprovados. Foram priorizados estudos publicados majoritariamente entre 2015 e 2026, que apresentassem testes reais de campo ou estufa. O foco principal da seleção foi encontrar dados que comparassem o desempenho das matrizes de quitosana com a aplicação da ureia convencional, observando o ganho de biomassa das plantas e a saúde biológica do solo.

No final, todas as informações extraídas dos artigos foram organizadas para permitir uma comparação direta entre as tecnologias. Os dados foram agrupados para mostrar como a quitosana ajuda a planta a aproveitar melhor o nitrogênio, protege contra patógenos e melhora a atividade das enzimas no solo. Essa organização serviu de base para a construção das tabelas e para as discussões detalhadas nos capítulos seguintes deste trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fertilizantes de liberação controlada (CRF)

3.1.1 Evolução tecnológica e contexto histórico

Conforme revisado por Eddarai et al. (2024), o desenvolvimento dos fertilizantes de liberação controlada (CRFs) não foi um processo linear, mas sim uma evolução tecnológica em resposta direta aos gargalos ambientais da agricultura tradicional. O conceito básico surgiu ainda na década de 1950, focado em mitigar a lixiviação de nutrientes, mas foi nos anos 1970 que as tecnologias de encapsulamento ganharam escala com o uso de enxofre e resinas. O salto qualitativo mais significativo ocorreu entre 1980 e 1990, quando a introdução de revestimentos poliméricos permitiu que a liberação fosse regulada por variáveis externas, como temperatura e umidade. Posteriormente, entre 2000 e 2010, a indústria refinou a especificidade das fórmulas para atender demandas nutricionais de culturas particulares. Na última década, essa trajetória atingiu um novo patamar de precisão com a consolidação das matrizes poliméricas e produtos mistos, garantindo um controle mais rigoroso e previsível da oferta de nutrientes ao solo.

Sob a ótica dos mecanismos físico-químicos, a evolução dos CRFs buscou transitar de padrões de liberação abruptos para padrões mais complexos e eficientes. O primeiro estágio do processo envolve a penetração de vapor d'água através do revestimento, dissolvendo parte do núcleo sólido e gerando pressão interna. Historicamente, revestimentos frágeis e não elásticos, como o enxofre, operavam por um Mecanismo de Falha, resultando na ruptura da membrana e liberação instantânea do conteúdo. Em contrapartida, a evolução para fertilizantes revestidos com polímeros permitiu o estabelecimento de um "Mecanismo de Difusão", no qual a membrana resiste à pressão interna, permitindo uma liberação gradual e sigmoide. Este padrão sigmoide é considerado agronomicamente superior, pois sincroniza a disponibilização de nutrientes com a curva de absorção das plantas, diferentemente dos processos lineares simples ou de falha catastrófica (SHAVIV; RABAN; ZAIDEL, 2003; KASSEM et al., 2024).

No que tange aos materiais constituintes, os primeiros polímeros empregados na produção de fertilizantes revestidos foram resinas termofixas (resina alquídea, epóxi, de melamina, de uretano) e polímeros termoplásticos (polietileno, polipropileno, poli-vinil acetal). A seleção inicial desses materiais baseou-se em sua insensibilidade a fatores ambientais do solo, como atividade microbiana, pH e salinidade, permitindo que a liberação fosse governada

primordialmente pela temperatura e pelas características físicas do revestimento. Contudo, a não biodegradabilidade desses polímeros sintéticos resultou na acumulação de resíduos no agroecossistema, fenômeno criticamente apontado como poluição branca (KASSEM et al., 2024). Diante desse severo passivo ambiental e da toxicidade inerente à manufatura petroquímica, a trajetória de evolução dos CRFs culmina, na atualidade, em uma transição tecnológica. Conforme elucida a revisão de Vejan et al. (2021), o paradigma contemporâneo concentra-se na substituição dessas matrizes tradicionais por polímeros biodegradáveis e de fontes renováveis. Essa transição possui objetivos bem delineados: mitigar os danos ecológicos, assegurar a viabilidade comercial por meio de biomateriais abundantes de baixo custo e garantir a efetividade agronômica com sistemas capazes de promover um controle preciso da liberação, sincronizando a oferta de nutrientes com a demanda fisiológica das culturas.

3.1.2 Diferenciação técnica: fertilizantes de liberação lenta versus fertilizantes de liberação controlada

A classificação das tecnologias de liberação lenta (SRFs) e controlada (CRFs) é fundamentada, primordialmente, em seus mecanismos de disponibilização de nutrientes. De acordo com a revisão de Lakshani et al. (2023), como a produtividade e a qualidade das culturas dependem de uma oferta nutricional precisa, o entendimento desses mecanismos é o que permite alinhar o comportamento do fertilizante à curva de demanda real da planta, considerando as práticas de manejo e as condições edafoclimáticas.

No que diz respeito aos fertilizantes de liberação lenta (SRFs), Lakshani et al. (2023) explicaram que a taxa de entrega é dada pela baixa solubilidade da matriz, sofrendo influência direta da hidrólise química e da atividade microbiológica do solo. Nesse sistema, a manipulação da solubilidade é a estratégia central para prolongar a biodisponibilidade. Variáveis como a temperatura e o tamanho das partículas desempenham papéis cruciais, visto que a área de superfície disponível dita a velocidade da degradação, embora os autores ressaltem que as evidências sobre o impacto real do decaimento microbiano nesse processo ainda sejam limitadas na literatura.

Em contrapartida, os mesmos autores categorizaram os fertilizantes de liberação controlada (CRFs) como uma evolução tecnológica, que introduz uma barreira física para entregar a solubilidade do sistema. Este estudo elucida que o mecanismo de controle nos CRFs não depende da decomposição da matriz, mas sim de fenômenos físicos de difusão e inchamento. O

processo é mediado pela permeação de vapor de água através dos microporos do revestimento, o que dissolve o núcleo e gera uma pressão osmótica capaz de impulsionar os nutrientes de forma previsível. Essa configuração permite que os CRFs respondam de maneira mais estável a fatores como temperatura e umidade, minimizando as flutuações biológicas comuns aos sistemas reativos (LAKSHANI et al., 2023).

A definição normativa desses materiais estabelece critérios rigorosos para sua classificação, exigindo que o comportamento de liberação obedeça a parâmetros temporais específicos que garantam a longevidade da nutrição. De acordo com padrões internacionais, um fertilizante só pode ser classificado como de liberação controlada se, sob condições definidas (geralmente 25°C), liberar não mais que 15% de seus nutrientes em 24 horas, não mais que 75% em 28 dias, e pelo menos 75% ao final do tempo de liberação declarado pelo fabricante. Essas métricas evidenciam que a tecnologia CRF não visa apenas retardar a dissolução, mas sim controlar um perfil de liberação previsível e reprodutível, permitindo que o agricultor planeje a nutrição da safra com uma precisão inalcançável através dos fertilizantes de liberação lenta convencionais (EDDARAI et al., 2024).

Tabela 1 - Comparativo técnico entre fertilizantes de liberação lenta (SRF) e fertilizantes de liberação controlada (CRF).

Característica	Liberação Lenta (SRF)	Liberação Controlada (CRF)
Mecanismo Principal	Baixa solubilidade intrínseca da matriz ou do composto químico.	Presença de uma barreira física (revestimento) que regula a saída do nutriente.
Fatores Influenciadores	Hidrólise química e, principalmente, atividade microbiológica do solo.	Fenômenos físicos de difusão, inchamento e pressão osmótica.
Previsibilidade	Menor, devido à dependência de flutuações biológicas e ambientais variáveis.	Maior e mais estável; responde de forma previsível à temperatura e umidade.
Padrão de Liberação	Frequentemente reativo ou linear, dependendo da degradação da matriz.	Padrão sigmoide, que sincroniza a oferta com a curva de absorção da planta.
Crítérios Normativos	Focados na extensão da biodisponibilidade através da solubilidade.	Rigorosos parâmetros temporais (ex: <15% em 24h e >75% no tempo declarado).

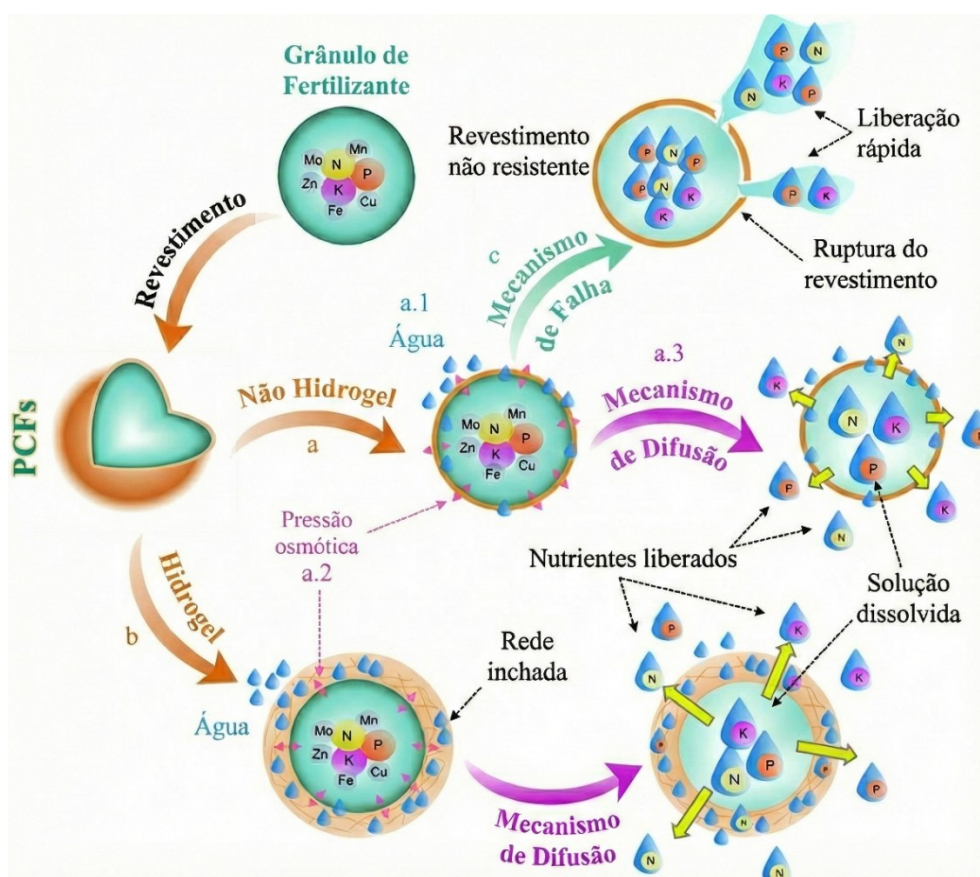
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Lakshani et al. (2023) e Eddarai et al. (2024).

3.1.3 Mecanismos físico-químicos de difusão e liberação

O mecanismo de liberação de nutrientes em fertilizantes revestidos por polímeros (PCFs) é regido, primordialmente, pela difusão através da membrana polimérica, que atua como uma barreira semipermeável entre o núcleo e o meio externo. De acordo com a revisão de Kassem et al. (2024), essa transferência ocorre da interface fertilizante-polímero para o meio liberador, em função da porosidade da rede, sendo influenciada diretamente pelas propriedades hidrofóbicas ou hidrofílicas do revestimento.

Os diferentes percursos físico-químicos que determinam se a liberação de nutrientes ocorrerá de forma gradual, por intumescimento ou por ruptura estrutural estão esquematizados na Figura 1.

Figura 1 - Mecanismos de difusão.



Fonte: Adaptado de Kassem et al. (2024).

As diferentes trajetórias de liberação ilustradas na Figura 1 são detalhadas com base nesse modelo do estudo de Kassem et al. (2024):

a) Sistemas não-hidrogéis (Difusão multi-estágio)

Nos sistemas baseados em polímeros que não sofrem intumescimento (Figura 1a), o transporte segue o chamado mecanismo de difusão multi-estágio. Este processo é caracterizado por um padrão de liberação sigmoidal que ocorre em três fases: latência, liberação constante e decaimento:

1. Fase de latência (Lag): Neste estágio inicial, a água do solo penetra a membrana polimérica, seja na forma de líquido ou vapor, infiltrando-se pelos microporos até atingir o núcleo sólido do fertilizante. Uma vez no interior, a umidade condensa-se e dissolve uma pequena fração do nutriente, elevando a pressão interna e osmótica do grânulo. Embora o peso do grânulo aumente, não há liberação efetiva de nutrientes para o meio externo, pois este período é dedicado ao preenchimento dos vazios internos e à saturação da rede.

2. Fase de liberação constante (Estacionária): A liberação propriamente dita inicia-se apenas quando um volume crítico de solução saturada é formado dentro do revestimento. Nesse ponto, o gradiente de concentração e a pressão osmótica atuam como forças motrizes que impulsionam os nutrientes através da membrana de forma lenta e gradual. Como a concentração interna permanece saturada enquanto houver fertilizante sólido, a taxa de liberação mantém-se uniforme, estabelecendo um estado estacionário entre o fluxo de água que entra e o soluto que sai.

3. Fase de decaimento: Esta etapa ocorre quando a maior parte do núcleo fertilizante já foi dissolvida e transportada para o solo. Com a diminuição da quantidade de soluto no interior do grânulo, o gradiente de concentração e a pressão interna reduzem-se drasticamente. Consequentemente, a força motriz que sustentava o processo enfraquece, levando a uma queda progressiva na taxa de liberação até o esgotamento total do sistema.

b) Sistemas hidrogéis (Intumescimento e difusão)

Para os revestimentos do tipo hidrogel (Figura 1b), o mecanismo é regido pela capacidade de absorção de água e intumescimento da rede polimérica. Nesse cenário, a expansão do volume do material promove a dilatação dos poros da rede, o que facilita o fluxo difusivo dos nutrientes. Uma vantagem crítica desses sistemas é a elasticidade da membrana, que oferece resistência mecânica superior para suportar a pressão osmótica interna sem comprometer a integridade do revestimento.

c) Mecanismo de Falha (Liberação catastrófica)

O processo de difusão ideal é interrompido caso a pressão osmótica interna exceda a resistência mecânica do polímero. Esse fenômeno, denominado mecanismo de falha (Figura 1c),

resulta no rompimento da camada protetora e na liberação espontânea de todo o conteúdo nutricional. Este comportamento é comumente observado em revestimentos frágeis ou pouco elásticos, como o enxofre, onde a falha estrutural impossibilita o controle efetivo da liberação.

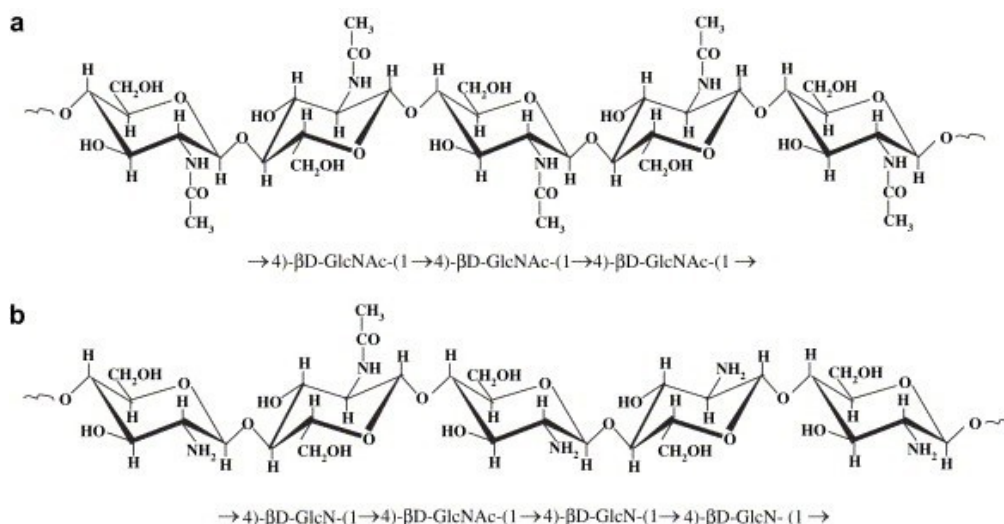
3.2 Quitosana: propriedades e processamento

3.2.1 Origem e ocorrência natural

A quitosana revela-se como um biopolímero de extraordinária relevância, posicionando-se na fronteira entre a abundância natural e a inovação tecnológica ao atuar como a herdeira direta da quitina, molécula que detém o título de segunda biomolécula mais abundante na biosfera, superada apenas pela celulose, e que provê a estrutura essencial das paredes celulares de fungos, escamas de peixes e dos exoesqueletos de artrópodes (HARISH PRASHANTH; THARANATHAN, 2007).

Essa transição entre os polímeros, frequentemente descrita como uma emancipação química e apresentada estruturalmente na Figura 2, ocorre através do processo de desacetilação, o qual altera profundamente a identidade do material; enquanto a quitina original é marcada por uma estrutura rígida e insolúvel devido à densa rede de ligações de hidrogênio, a quitosana emerge dessa transformação como uma alternativa versátil, biocompatível e responsiva, cujas propriedades físico-químicas permitem sua aplicação em sistemas tecnológicos que superam as limitações de sua precursora natural (HARISH PRASHANTH; THARANATHAN, 2007).

Figura 2 - Estrutura primária de (a) quitina e (b) quitosana.



Fonte: Harish Prashanth, Tharanathan (2007).

De acordo com Harish Prashanth e Tharanathan (2007), essa mudança estrutural abre um espectro de aplicações que a quitina, em sua forma bruta, não conseguiria alcançar. O crescente interesse científico por este material não reside apenas em seu caráter renovável, mas em um conjunto de virtudes raras: a quitosana é inerentemente atóxica, bioativa e biodegradável. Essas propriedades a convertem na candidata ideal para solucionar desafios contemporâneos, unindo a precisão da biomedicina à urgência de uma agricultura sustentável e regenerativa.

3.2.2 A metamorfose química: o processo de desacetilação

A obtenção da quitosana a partir da quitina não se trata apenas de uma extração, mas de uma modificação estrutural profunda, frequentemente denominada na literatura como um processo de desacetilação. Segundo Younes e Rinaudo (2015), o termo quitosana refere-se a uma família de polímeros obtidos após a desacetilação da quitina em graus variados. Do ponto de vista químico, essa transformação envolve a remoção dos grupos acetila da cadeia polimérica e, concomitantemente, uma reação de despolimerização que resulta na redução do peso molecular (Mw) do biopolímero.

Embora a desacetilação possa ser realizada por via enzimática ou química, os métodos químicos são predominantes em escala comercial devido ao menor custo e adequação para produção em massa. Entre as abordagens químicas, a hidrólise alcalina é preferível à ácida, uma vez que as ligações glicosídicas da espinha dorsal do polímero são altamente suscetíveis à degradação em meio ácido. De acordo com Younes e Rinaudo (2015), a reação de N-desacetilação alcalina pode ser conduzida de duas formas distintas, resultando em microestruturas diferentes:

- **Método Heterogêneo:** A quitina é tratada com soluções concentradas de hidróxido de sódio (NaOH) a quente por algumas horas. Este processo produz uma quitosana como resíduo insolúvel, com graus de desacetilação (DD) variando tipicamente entre 85% e 99%. A característica marcante deste método é a distribuição irregular dos grupos acetila e amino ao longo da cadeia, tendendo a uma formação em blocos.
- **Método Homogêneo:** Envolve a dispersão da quitina em NaOH concentrado seguida de dissolução em gelo picado a temperaturas próximas de 0 °C. Este processo resulta em uma quitosana solúvel com um grau médio de acetilação entre 50% e 55%. Vale destacar que esse processo produz desacetilação com grupos acetil distribuídos uniformemente ao longo das cadeias.

A mudança é concluída quando o polímero cruza o limiar de solubilidade. Younes e Rinaudo (2015) estabelecem que, quando o grau de acetilação (GA) é inferior a 50% em mol, a quitina passa a ser classificada como quitosana.

3.2.3 Estrutura molecular, solubilidade e grupos funcionais

➤ Estrutura molecular e solubilidade

A quitosana é definida quimicamente como um copolímero binário composto por unidades de β -(1 $\rightarrow$ 4)-N-acetil-d-glucosamina e unidades de β -(1 $\rightarrow$ 4)-d-glucosamina. Essa estrutura é caracterizada pelo seu Grau de Acetilação (GA), que representa a fração molar de unidades acetiladas presentes na cadeia polimérica. A distinção fundamental entre a quitina e a quitosana reside justamente nesse parâmetro: quando o GA é inferior a 50%, o biopolímero é classificado como quitosana, adquirindo a capacidade de se dissolver em soluções aquosas ácidas (YOUNES; RINAUDO, 2015).

A solubilidade da quitosana é dependente tanto do seu GA quanto do peso molecular (PM), mas é fortemente influenciada pela distribuição dos grupos acetil ao longo da cadeia principal. Em meios com pH inferior a 6, os grupos amino livres ($-NH_2$) localizados na posição C-2 das unidades de D-glucosamina sofrem protonação, conferindo caráter polieletrólítico à molécula e permitindo sua solubilização em ácidos. Esse comportamento ocorre porque o valor de pKa intrínseco da quitosana é de aproximadamente 6,5, o que torna a molécula solúvel apenas quando a maioria de seus grupos amino está carregada positivamente (YOUNES; RINAUDO, 2015).

Do ponto de vista conformacional, a quitosana é descrita como um polímero semirrígido, característica que influencia seu volume hidrodinâmico e viscosidade. Essa rigidez é quantificada pelo comprimento de persistência (L_p), que é de aproximadamente 9 nm para a quitosana totalmente desacetilada em excesso de sal, aumentando conforme o grau de acetilação se eleva. Essa natureza semirrígida, somada à presença de grupos polares capazes de formar redes de pontes de hidrogênio, confere ao material excelentes propriedades de formação de filmes e estabilidade estrutural (YOUNES; RINAUDO, 2015).

➤ Grupos funcionais e capacidade de adsorção (Interação com nutrientes)

A quitosana possui grupos funcionais fundamentais, especificamente grupos amina ($-NH_2$) e hidroxila ($O-H$), que permitem interações químicas complexas com fertilizantes como o NPK. Conforme Messa, Contieri e Faez (2023), quando a quitosana é solubilizada em meio ácido (ácido acético), ocorre a protonação dos grupos amina, que são convertidos em NH_3^+ . Essa transformação é crucial, pois torna a matriz polimérica carregada positivamente, facilitando a interação com espécies aniônicas presentes nas fontes de nitrogênio, como o sulfato (SO_4^{2-}) derivado do sulfato de amônio.

A existência dessas interações eletrostáticas entre os grupos amina protonados da quitosana e os ânions do fertilizante é evidenciada pela alteração na estabilidade térmica e na coloração das soluções de filme. A análise de espectroscopia no infravermelho (FTIR) confirmou essa ligação através da diminuição da banda característica de vibrações N-H em 1561 cm^{-1} , o que demonstra que os sítios ativos da quitosana estão efetivamente vinculados aos componentes do fertilizante. Essas ligações químicas são o que permite que a quitosana atue não apenas como um suporte físico, mas como um agente de controle químico da liberação (MESSA; CONTIERI; FAEZ, 2023).

Complementarmente, Messa, Contieri e Faez (2023) observaram que a liberação do íon amônio (NH_4^+), principal fonte de nitrogênio no estudo, ocorre de forma controlada através da difusão pela matriz de quitosana inchada. A retenção do nitrogênio é influenciada tanto pelas forças de atração eletrostática quanto por interações de van der Waals e ligações de hidrogênio entre a matriz polimérica e os nutrientes. Esse mecanismo garante que o nutriente não seja liberado imediatamente em contato com a água, seguindo um modelo de difusão quase-fickiana.

3.2.4 Versatilidade metodológica na produção de matrizes e filmes

A ampla aplicabilidade da quitosana no desenvolvimento de fertilizantes de liberação controlada (CRFs) fundamenta-se em sua reatividade química intrínseca e versatilidade morfológica. Segundo Nandini et al. (2025), a presença de grupos funcionais amino e hidroxila ao longo do esqueleto polimérico confere alta afinidade de ligação, permitindo que o biopolímero seja moldado em diversas arquiteturas, que variam de nanopartículas e microesferas a hidrogéis e filmes. Essa maleabilidade estrutural é determinante para a engenharia de matrizes capazes de

modular a cinética de liberação de nutrientes e simultaneamente atuar na proteção de cultivos, adaptando-se às necessidades agronômicas específicas (ZAHOOOR et al., 2025).

No espectro da nanotecnologia, estudos recentes de Marquez Cazorla et al. (2025) e Meena et al. (2024) exemplificaram como a capacidade da quitosana de formar complexos polieletrólíticos pode ser explorada via gelificação iônica. Este método aproveita a natureza policatiónica do polímero para interagir com agentes reticulantes aniônicos, como o tripolifosfato de sódio (TPP). Segundo os pesquisadores, ao ajustar as condições de síntese, é possível encapsular tanto complexos NPK quanto íons específicos em nanopartículas estáveis, onde a quitosana atua como uma matriz ativa que protege os nutrientes da lixiviação imediata.

Para aplicações que demandam maior robustez estrutural e controle preciso da liberação de nutrientes, diferentes rotas de processamento da quitosana têm sido exploradas. As investigações de Faqir et al. (2023) destacaram a eficácia da preparação de microesferas utilizando a técnica de emulsificação seguida de reticulação química com glutaraldeído. Essa rota promove a formação de ligações covalentes que estabilizam a matriz polimérica, resultando em um sistema capaz de controlar a liberação de nitrogênio e, simultaneamente, melhorar as características biológicas do solo e o crescimento da *Brassica rapa*.

Em uma abordagem distinta, visando a multifuncionalidade do sistema como fertilizante e condicionador de solo, Iftime et al. (2019) desenvolveram hidrogéis através da hidrogelação *in situ* da quitosana com salicilaldeído. Diferente da reticulação com glutaraldeído, este método baseia-se na formação de ligações imina (bases de Schiff) e na auto-organização de agregados supramoleculares que atuam como nós de reticulação. De acordo com o estudo, tal modificação cria uma matriz porosa capaz de reter até 154% de água no solo e liberar ureia de forma sustentada, guiada por mecanismos de difusão dependentes da morfologia do hidrogel.

Por fim, a capacidade filmogênica da quitosana em revestimentos compósitos é explorada para modular as propriedades de barreira. Messa, Contieri e Faez (2023) evidenciaram que a incorporação de derivados de fibras de bagaço de cana-de-açúcar (como holocelulose e celulignina) em filmes de quitosana altera significativamente a capacidade de adsorção de nutrientes e previne a retração dos filmes durante a secagem, permitindo um ajuste fino na liberação de fertilizantes NPK.

Essa multiplicidade de estratégias de síntese e processamento demonstra a intrínseca versatilidade da quitosana como matriz para fertilizantes de liberação controlada. A existência de uma vasta gama de métodos de produção não é acidental, mas decorre diretamente da capacidade do biopolímero em ser moldado em diferentes arquiteturas. Portanto, essa flexibilidade

tecnológica permite a modulação precisa das propriedades físico-químicas e dos perfis de liberação de nutrientes, confirmando que a diversidade metodológica é fundamental para adaptar o material às demandas específicas de diferentes culturas, consolidando a quitosana como uma plataforma altamente adaptável para a inovação na agricultura sustentável (ZAHOOR et al., 2025; EDDARAI et al., 2024).

3.3 Potencial multifuncional da quitosana na agricultura

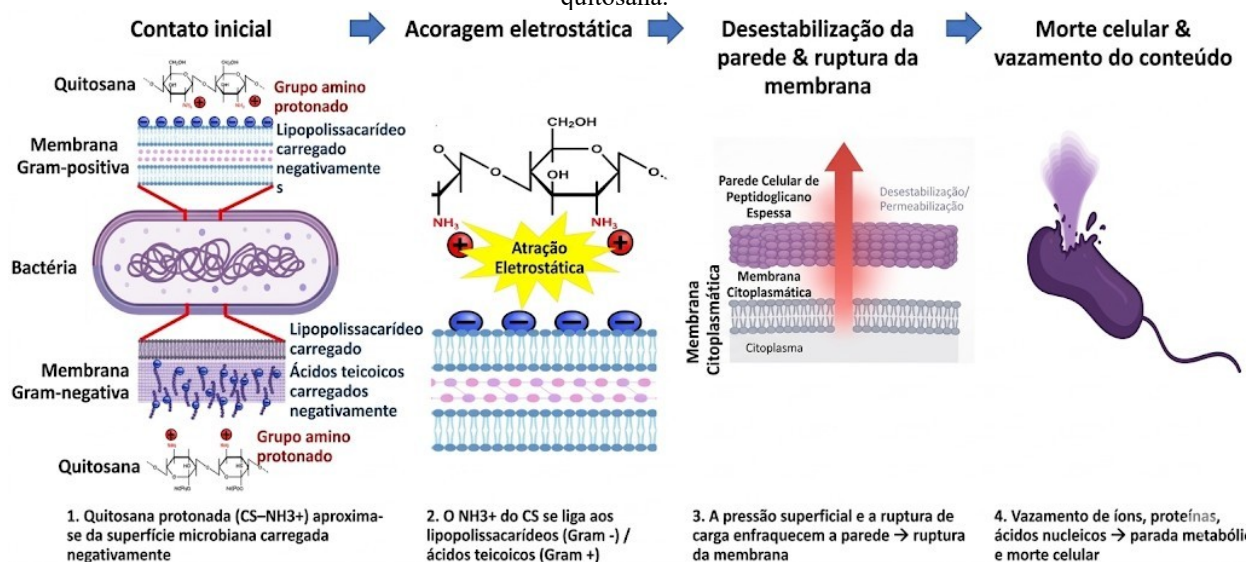
3.3.1 Propriedades biocidas

A eficácia antimicrobiana da quitosana fundamenta-se em sua natureza polieletrólita catiônica, um estado alcançado através da protonação de seus grupos amina (NH_3^+) em meio ácido. O mecanismo de ação central assemelha-se a uma interação de forças: a densidade de cargas positivas do polímero atrai eletrostaticamente as moléculas carregadas negativamente na superfície das bactérias. Essa adesão compromete a integridade da barreira celular, alterando sua permeabilidade e provocando o extravasamento de constituintes vitais, como eletrólitos e proteínas, o que conduz à morte do microrganismo. Além desse impacto estrutural, a quitosana é capaz de penetrar na célula para inibir a síntese de RNA ao ligar-se ao DNA, ou ainda agir como um agente quelante, removendo íons metálicos essenciais para a estabilidade microbiana (CHUNG; CHEN, 2008).

Para além de alterar a permeabilidade geral, a ação da quitosana se destaca por afetar a camada protetora externa das bactérias de uma maneira bastante específica. Conforme demonstrado por Helander et al. (2001), o contato com o biopolímero deforma e danifica essa barreira superficial, mas não rompe a célula de forma violenta a ponto de espalhar seus pedaços estruturais pelo ambiente. A principal consequência desse ataque é que as bactérias perdem sua proteção natural, ficando severamente enfraquecidas e altamente vulneráveis à ação de outras substâncias que normalmente não conseguiriam penetrá-las. Os pesquisadores também observaram que esse dano funciona como um processo reversível caso a quitosana seja removida do meio orgânico. Pensando na aplicação prática em fertilizantes de liberação controlada, essa descoberta revela uma grande vantagem no campo: a quitosana pode agir em equipe, quebrando a "armadura" dos patógenos presentes no solo e abrindo caminho para que outros compostos defensivos e bioativos entrem no interior do microrganismo nocivo com muito mais facilidade e eficácia.

A eficácia antibacteriana da quitosana fundamenta-se primordialmente em sua natureza polieletrólita catiônica, um estado alcançado através da protonação de seus grupos amino em meio ácido. Essa densidade de cargas positivas atrai eletrostaticamente as moléculas carregadas negativamente presentes na superfície das bactérias, comprometendo progressivamente a integridade de sua barreira celular. Visando elucidar a dinâmica visual desse processo, a Figura 3 apresenta uma representação esquemática das etapas de desestabilização da membrana bacteriana mediada pelo biopolímero, cujos mecanismos de ação específicos e impactos fisiológicos no patógeno serão detalhados a seguir.

Figura 3 - Ilustração das etapas de desestabilização da membrana bacteriana mediada pela ação policatiônica da quitosana.



Fonte: Adaptado de Bouanga et al. (2026)

Conforme detalhado na Figura 3, a cascata de eventos do processo antimicrobiano é deflagrada pelo ancoramento eletrostático entre os grupos amino protonados (NH_3^+) da quitosana e os componentes aniônicos do envoltório celular microbiano, notadamente os lipopolissacarídeos nas bactérias Gram-negativas e os ácidos teicoicos nas Gram-positivas. Uma vez estabelecida essa ligação primária, cuja ocorrência é estritamente dependente de um microambiente com pH inferior a 6,3 para assegurar a carga catiônica do biopolímero, ocorre uma severa desestabilização estrutural da membrana celular que culmina em sua ruptura. Este colapso mecânico provoca o extravasamento letal do conteúdo intracelular e conduz à consequente parada metabólica e morte do patógeno (BOUANGA et al., 2026).

Para além da interferência física superficial ilustrada, Bouanga *et al.* (2026) ressaltam que o mecanismo de morte celular transcende o rompimento do envoltório, caracterizando-se por uma complexa sinergia multifatorial letal. Esta rede de mecanismos subjacentes abrange a indução de estresse oxidativo intenso por meio da geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), a quelatação de cátions bivalentes vitais para a homeostase do microrganismo, como o magnésio (Mg^{2+}) e o cálcio (Ca^{2+}), a interferência em sistemas enzimáticos e a inibição das rotas de comunicação celular, o que previne a formação de biofilmes. Adicionalmente, a magnitude e o sítio exato dessa atividade biocida são rigorosamente modulados pela arquitetura da molécula: matrizes com Grau de Desacetilação (DDA) superior a 70% intensificam substancialmente a desestruturação do envoltório devido à maior densidade de cargas protonadas. Em paralelo, o peso molecular (Mw) dita a profundidade do ataque; frações de alto peso molecular atuam predominantemente no meio extracelular, formando um filme contínuo que bloqueia o transporte de nutrientes e induz a floculação, enquanto as cadeias de baixo peso molecular transpassam o envelope danificado para se ligarem a alvos intracelulares, como o próprio DNA bacteriano, inviabilizando etapas cruciais da transcrição genética e da síntese de mRNA (BOUANGA *et al.*, 2026).

3.3.2 Indução de resistência biótica

Em relação ao caráter de resistência biótica a imunidade inata vegetal é dada pelo reconhecimento de padrões moleculares associados a patógenos ou microrganismos (PAMPs/MAMPs) via receptores de reconhecimento de padrões (PRRs) transmembranares, processo no qual a quitosana atua como um potente elicitor exógeno capaz de mimetizar esses sinais e deflagrar a resistência sistêmica. No nível bioquímico, essa interação desencadeia uma complexa cascata de sinalização celular que inclui o influxo citosólico de H^+ e Ca^{2+} , a ativação de MAP-quinases, a explosão oxidativa e a síntese de ácido abscísico, jasmonatos, fitoalexinas e proteínas relacionadas à patogênese (PR) (EL HADRAMI *et al.*, 2010).

Como consequência direta dessa sinalização bioquímica, ocorrem rápidas modificações citológicas e estruturais no tecido vegetal, especialmente no sistema radicular frente ao ataque de patógenos edáficos. A verificação dessas defesas inclui a formação de papilas protetoras, a deposição de calose e de materiais osmofílicos, além da oclusão estratégica de vasos do xilema. Tais barreiras físicas restringem severamente a colonização de fungos patogênicos, a exemplo das espécies do gênero *Fusarium*, às camadas epidérmicas externas da raiz, garantindo a

sobrevivência da cultura. Ressalta-se, contudo, que a eficiência biológica de todo esse mecanismo está intrinsecamente vinculada às propriedades físico-químicas do polímero, como peso molecular, grau de desacetilação e viscosidade, parâmetros que devem ser rigorosamente otimizados para maximizar a proteção fitossanitária e mitigar potenciais efeitos citotóxicos ao hospedeiro (EL HADRAMI et al., 2010; LAFONTAINE; BENHAMOU, 1996).

3.3.3 Indução de resistência a estresses abióticos

A quitosana também se destaca como um biopolímero linear de origem natural, derivado da quitina, que possui grande potencial na mitigação de estresses abióticos em culturas agrícolas. Sua aplicação como eliciador tem sido explorada devido à capacidade de induzir respostas defensivas em plantas submetidas a condições adversas, como a salinidade, auxiliando na adaptação e sobrevivência do vegetal frente a pressões ambientais. De acordo com Attia et al. (2021), esse polissacarídeo é capaz de ativar vias metabólicas específicas que protegem as estruturas celulares, tornando-se uma alternativa viável e sustentável para o manejo de estresses no campo ao melhorar a capacidade da planta de enfrentar desafios osmóticos.

No nível fisiológico, a indução de tolerância promovida pela quitosana está intrinsecamente ligada ao fortalecimento do sistema antioxidante e ao acúmulo de solutos compatíveis. O tratamento com esse biopolímero favorece a manutenção dos pigmentos fotossintéticos e estimula a produção de osmolitos, como a prolina e proteínas solúveis, fundamentais para o ajuste osmótico e proteção contra espécies reativas de oxigênio. Além disso, o biopolímero atua na neutralização de radicais livres, prevenindo danos oxidativos às membranas celulares por meio do incremento da atividade enzimática e de compostos fenólicos, que limitam a peroxidação lipídica sob condições de estresse (ATTIA et al., 2021).

A atuação da quitosana também se estende ao nível molecular, influenciando os padrões de isozimas e a expressão de proteínas relacionadas à defesa. Conforme observado por Attia et al. (2021), a aplicação foliar deste composto altera a densidade e o número de isoformas de enzimas essenciais, como a peroxidase e a superóxido dismutase, que compõem a linha de frente contra o desequilíbrio iônico. Nota-se ainda que o uso desse biopolímero possibilita a síntese de novo ou o reaparecimento de bandas proteicas de diferentes pesos moleculares que haviam sido suprimidas pela toxicidade do sal, consolidando uma estratégia de adaptação bioquímica que induz maior resistência ao vegetal.

Por fim, a eficácia da quitosana na indução de tolerância pode ser potencializada quando o polímero é associado a solventes orgânicos específicos, como os ácidos ascórbico e cítrico. A escolha do solvente correto promove efeitos sinérgicos que elevam o desempenho bioestimulante do produto, otimizando o equilíbrio entre íons de sódio e potássio nos tecidos e auxiliando na homeostase celular. Assim, a integração dessa tecnologia em formulações comerciais apresenta-se como um caminho promissor para estimular o metabolismo vegetal e garantir a produtividade em solos afetados por estresse abiótico, servindo como uma ferramenta de manejo eficiente na agricultura moderna (ATTIA et al., 2021).

3.3.4 Estruturas da Quitosana na Simbiose com rizosfera

A utilização da quitosana como matriz em fertilizantes de liberação controlada (CRFs) representa um avanço sustentável frente aos fertilizantes nitrogenados convencionais, que frequentemente provocam a acidificação do solo e o declínio da biodiversidade bacteriana. Por ser um polímero natural, biodegradável e não tóxico, a quitosana minimiza a lixiviação de nutrientes e estabelece um ambiente favorável ao desenvolvimento de comunidades microbianas benéficas. Estudos demonstram que o uso de microesferas desse polímero protege a saúde do solo contra os impactos da fertilização inorgânica, elevando significativamente a abundância e a diversidade bacteriana em comparação ao uso da ureia comum (FAQIR et al., 2023).

Essa melhora no ambiente radicular é potencializada pelo uso de fertilizantes nitrogenados modificados com quitosana (Cm-CRNFs), que promovem uma rizosfera mais diversificada ao favorecer o enriquecimento de grupos bacterianos fundamentais, como *Actinobacteriota* e *Cyanobacteria*. Além do suporte à biodiversidade, essa tecnologia intensifica atividades enzimáticas cruciais, como a urease, fosfatase e catalase, que são responsáveis por prolongar a disponibilidade de micro e macronutrientes. Ao contrário da ureia convencional, a liberação controlada mediada pela quitosana preserva a integridade dos processos biológicos e aumenta a biomassa microbiana, otimizando a fertilidade do substrato ao longo do tempo (ZAHOOR et al., 2025).

A consolidação dessa ecologia do solo mais resistente ocorre por meio de uma relação simbiótica, na qual a microbiota degrada gradualmente os polímeros de quitosana, regulando a entrega de nutrientes e preservando as propriedades físicas e químicas do habitat. Quando esses sistemas são integrados a materiais como o biocarvão, observa-se uma sinergia que eleva o carbono oxidável e ajusta o pH do solo, resultando em uma absorção de nutrientes

consideravelmente mais eficiente pelas plantas. Assim, o uso da quitosana em sistemas de liberação controlada permite alinhar a alta produtividade aos princípios da química verde, garantindo o aporte nutricional necessário sem comprometer o equilíbrio bacteriano do solo (FAQIR et al., 2023; ZAHOOOR et al., 2025).

3.3.5 Atividade enzimática do solo

A dinâmica da microflora do solo, intimamente ligada à secreção de complexos enzimáticos, é profundamente alterada pela aplicação de fertilizantes de liberação controlada à base de nanocompósitos de quitosana e ureia. O emprego do biopolímero como matriz carreadora promove um aumento na diversidade microbiana, resultando em um incremento significativo nas contagens viáveis de microrganismos associados à fertilidade. Especificamente, constata-se que os solos tratados com o nanocompósito de quitosana apresentam populações de bactérias aeróbicas totais expressivamente superiores às aquelas observadas em áreas tratadas exclusivamente com a ureia convencional. Esse aumento da população bacteriana aeróbica sugere que a matriz protetora do fertilizante atua não apenas como uma barreira limitante, mas funciona como um bioestimulador, fornecendo um microambiente que sustenta a proliferação contínua da biomassa viável ao longo do ciclo de cultivo (KONDAL et al., 2021).

No que concerne estritamente aos microrganismos mediadores das vias enzimáticas do ciclo do nitrogênio, a quitosana exerce um rigoroso papel modulador. A aplicação de fontes nitrogenadas convencionais e altamente solúveis provoca elevações drásticas nas populações de bactérias oxidadoras de amônia e redutoras de nitrato, o que acelera a rápida conversão da ureia e predispõe o sistema a perdas nutricionais e ambientais. Em contrapartida, as formulações desenvolvidas em nanocompósitos atenuam esse forte estímulo microbiológico temporário, controlando de forma estável o processo de nitrificação. Esse controle é amplamente comprovado em nível molecular por meio de análises quantitativas (q-PCR), que demonstram a modulação e a redução na abundância do gene *amoA*, o principal marcador genético para bactérias (AOB) e arqueas (AOA) oxidadoras de amônia no solo. Ao regular essas subpopulações microbiológicas específicas, a quitosana resguarda as concentrações de nitrogênio amoniacal e nítrico na rizosfera, prolongando a disponibilidade equilibrada do nutriente sem estimular a exaustão do solo (KONDAL et al., 2021).

No âmbito da catálise bioquímica, a matriz de quitosana afeta de forma direcionada a atividade de enzimas extracelulares e intracelulares essenciais para a ciclagem de nutrientes. O

uso de microesferas de quitosana eleva de forma estatisticamente significativa a atividade da fosfatase ácida, otimizando a mineralização de fosfatos orgânicos para o sistema radicular das plantas, e incrementa a enzima urease de maneira controlada. Paralelamente, o biopolímero amplia de forma salutar a atividade da catalase, promovendo a decomposição do peróxido de hidrogênio tóxico e melhorando a capacidade de oxirredução do solo, o que ajuda a mitigar o estresse oxidativo que seria desfavorável ao desenvolvimento vegetal. No âmbito do ciclo do carbono, a quitosana deprime as oscilações bruscas de enzimas degradadoras de matrizes orgânicas, como a celulase e a β -glicosidase, evitando a hiperestimulação metabólica típica da ureia livre e preservando a integridade física e estrutural da matéria orgânica edáfica (FAQIR et al., 2023).

A integração destas respostas, tanto no arranjo filogenético microbiano quanto no âmbito estritamente enzimático, corrobora o elevado potencial multifuncional da quitosana no design de fertilizantes de liberação controlada de alta performance. A arquitetura dos compósitos à base desse biopolímero atua simultaneamente como uma barreira de proteção física contra perdas químicas rápidas e como um forte condicionador biológico do ecossistema rizosférico. Ao modular a expressão genética de microrganismos oxidadores de amônia e estabilizar populações aeróbicas, em direta sinergia com a otimização cadenciada das vias de fosfatases, catalases e de hidrólise da ureia, o sistema alcança um sincronismo ideal na liberação e na absorção nutricional. Essa regulação conjunta culmina na construção de um microambiente estruturalmente resiliente e ecologicamente balanceado, maximizando o aproveitamento e garantindo a sustentabilidade agrônômica das práticas de fertilização (FAQIR et al., 2023; KONDAL et al., 2021).

3.3.6 Atividade enzimática da planta

A fotossíntese, processo essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, pode ser prejudicada pela aplicação excessiva e imediata de ureia convencional, o que frequentemente compromete a produtividade das culturas devido à fitotoxidez inicial. Em contrapartida, o uso de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada à base de microesferas de quitosana (Cm-CRNFs) demonstra contornar esse problema, promovendo uma melhoria significativa nos pigmentos fotossintéticos e no vigor da planta. Esse efeito positivo está relacionado à capacidade dessas matrizes poliméricas de auxiliarem na ativação dos cloroplastos, aumentando a síntese de clorofila e a eficiência com que a folha capta e utiliza a energia luminosa. Além disso, a presença do biopolímero no sistema facilita a abertura estomática e a absorção do gás carbônico interno,

otimizando a produção de carboidratos sem submeter a planta a picos de estresse nutricional (MA et al., 2023).

Como reflexo direto dessa otimização no aparato fotossintético, o metabolismo primário da planta é amplamente beneficiado. Pesquisas atestaram que os teores de açúcares totais e de proteínas apresentaram aumentos expressivos sob tratamentos com os Cm-CRNFs, superando substancialmente os resultados obtidos com o uso de fontes de nitrogênio não revestidas. A eficácia superior desses novos fertilizantes decorre, portanto, da sua engenharia de liberação controlada, que assegura um suprimento nitrogenado contínuo, gradual e alinhado à demanda fenológica da cultura, promovendo o máximo rendimento metabólico e o desenvolvimento vegetativo pleno (MA et al., 2023).

4 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA QUITOSANA COMO AGENTE ESTRUTURANTE PARA FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA

4.1 Nutrição nitrogenada

A nutrição nitrogenada é fundamental para o rendimento agrícola, mas a ineficiência das fontes convencionais tem impulsionado a adoção de sistemas de liberação controlada ancorados em matrizes de quitosana. Este subcapítulo introduz o potencial bioestimulante dessas tecnologias, estabelecendo uma análise comparativa direta dos ganhos agronômicos e de biomassa frente ao manejo tradicional com ureia. Para comprovar essa eficácia, a seção detalha, inicialmente, os expressivos incrementos morfológicos e bioquímicos na cultura da couve-chinesa, fundamentando-se nos resultados de Faqir et al. (2023). Em seguida, aborda-se o efeito dose-dependente na batata, em que os dados de Kondal et al. (2021) evidenciam a possibilidade de obter altas produtividades mesmo com a redução da adubação sintética. Por fim, com base em Abou El-Enin et al. (2023), examina-se a otimização da absorção em milho e soja via aplicações de nanotecnologia, consolidando o biopolímero como um promotor essencial na maximização da Eficiência do Uso de Nitrogênio (NUE).

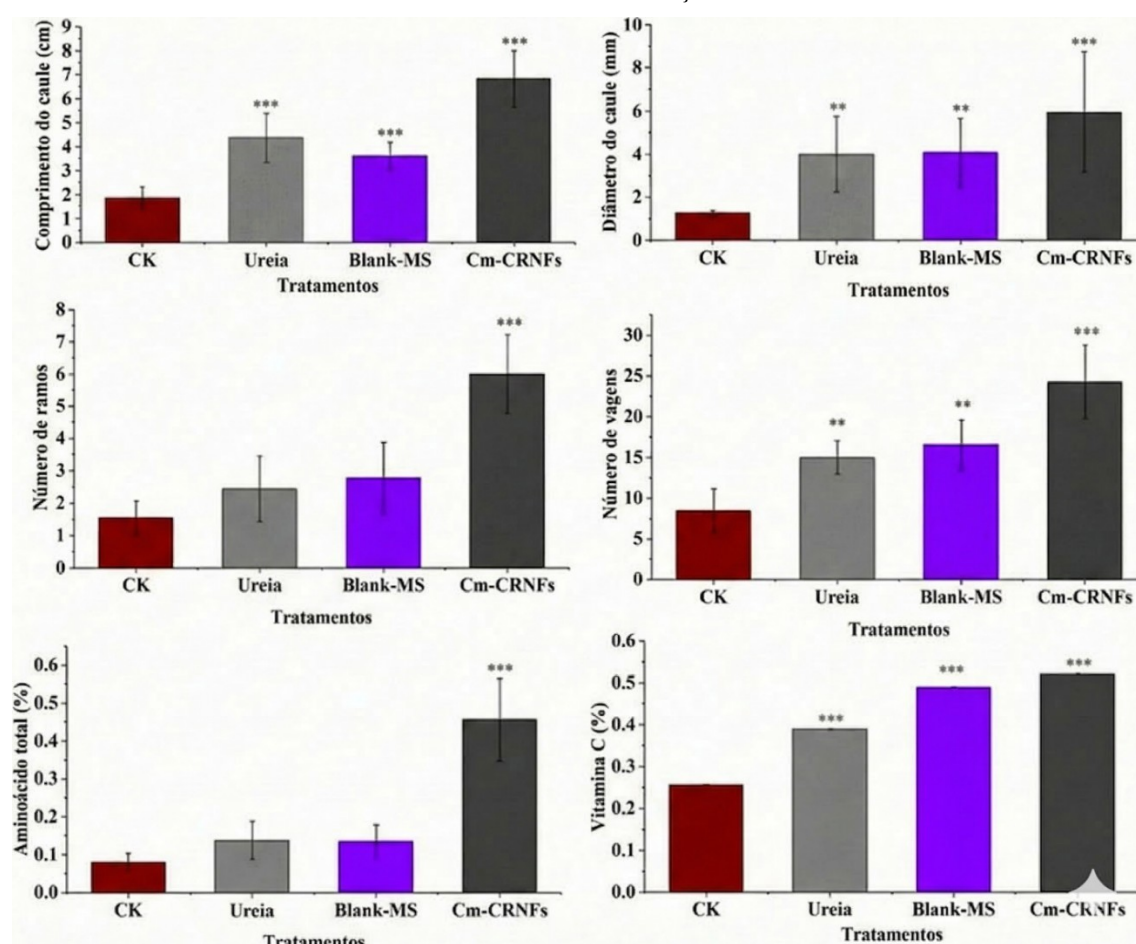
4.1.1 Potencial bioestimulante e ganhos de biomassa: uma análise comparativa

➤ Análise da cultura de couve-chinesa

A aplicação de microesferas de quitosana carregadas com ureia (Cm-CRNFs) demonstrou um impacto superior na morfologia vegetal em comparação aos métodos de fertilização convencionais, conforme ilustrado na Figura 4. De acordo com os resultados obtidos, o tratamento com Cm-CRNFs promoveu um incremento de 264,26% no comprimento do broto e de 366,72% no diâmetro, valores significativamente maiores do que os observados com o uso isolado de ureia (134,56% e 212,77%, respectivamente). Além disso, a estrutura da planta foi favorecida de maneira notável, apresentando uma elevação de 285,71% no número de ramos e de 186,61% na quantidade de vagens em relação ao grupo controle, sendo o uso de ureia isolado de 57,14% e 77,16%, respectivamente. Este desenvolvimento vigoroso evidencia que a matriz polimérica de quitosana não apenas atua na liberação controlada de nutrientes, mas também potencializa o crescimento vegetativo e reprodutivo da cultura (FAQIR et al., 2023).

Paralelamente ao ganho de biomassa, a qualidade bioquímica das plantas tratadas com o polímero carregado revelou um efeito bioestimulante profundo. Conforme os resultados detalhados na Figura 4, houve um aumento de 103,51% no teor de vitamina C, enquanto os aminoácidos totais apresentaram uma elevação expressiva de 469,21%, superando drasticamente os resultados da ureia (72,15%), que não demonstraram diferença significativa em relação ao controle no que tange aos aminoácidos. Tais dados sugerem que a sinergia entre o polímero e o nutriente otimiza as rotas metabólicas ligadas à síntese de compostos essenciais, consolidando o uso de sistemas baseados em quitosana como uma tecnologia de alto desempenho para o incremento da produtividade e do valor nutricional em hortaliças (FAQIR et al., 2023).

Figura 4 - Parâmetros morfológicos e bioquímicos de desenvolvimento da couve-chinesa submetida a diferentes tratamentos de fertilização.



Fonte: Adaptado de Faqir et al. (2023).

Nota: CK (Controle sem fertilizante); Ureia (Ureia convencional); Blank-MS (Microesferas de quitosana puras); Cm-CRNFs (Microesferas de quitosana carregadas com nitrogênio).

➤ Análise da cultura de batata

Os dados presentes na tabela 2 revelaram que o crescimento da parte aérea da planta foi significativamente superior sob a aplicação do fertilizante nanocompósito (NCUC) em todas as doses testadas (50%, 75% e 100% da dose recomendada de nitrogênio). Ao analisar a dose máxima (100%), o tratamento com NCUC proporcionou um peso fresco médio de 35,70 g, valor expressivamente maior do que os obtidos com a ureia convencional (27,44 g) e com a quitosana isolada (26,33 g). Essa mesma tendência de superioridade se manteve para o acúmulo de biomassa seca, no qual o tratamento com NCUC a 100% resultou em um peso seco de 32,40 g, superando substancialmente a ureia convencional, que registrou 24,93 g, e a quitosana, com 23,27 g (KONDAL et al., 2021).

Tabela 2 - Efeitos de diferentes fontes e concentrações de fertilizantes nos parâmetros de massa fresca e seca da parte aérea (g).

Nível de N	MF (CU)	MF (NCUC)	MF (CS)	MS (CU)	MS (NCUC)	MS (CS)	Média
0	18,27±0,10d	18,27±0,10d	18,27±0,10d	15,27±0,14d	15,00±0,25d	15,00±0,25d	16,68
50	23,39±0,36c	28,63±0,12c	23,50±0,21c	19,67±0,19c	24,63±0,17c	18,53±0,19c	23,06
75	26,48±0,03b	31,64±0,21b	24,54±0,23b	23,33±0,06b	28,67±0,12b	19,67±0,15b	25,72
100	27,44±0,41a	35,70±0,08a	26,33±0,38a	24,93±0,19a	32,40±0,12a	23,27±0,20a	28,34
Média	23,89	28,56	23,16	20,8	25,17	19,12	

Fonte: Adaptada de Kondal et al. (2021).

Nota: Abreviaturas utilizadas: MF (Massa Fresca); MS (Massa Seca); CU (Ureia Convencional); NCUC (Fertilizante Nanocompósito); CS (Quitosana Isolada). 2. Médias dentro de um subfator seguidas por uma letra diferente em uma coluna são significativamente diferentes em $p \leq 0,05$ de acordo com uma comparação pareada de médias de quadrados mínimos.

Um aspecto de extrema relevância agronômica e econômica destacado na Tabela 2 é o efeito dose-dependente e a otimização da eficiência do uso do nitrogênio. A aplicação de apenas 75% da dose recomendada de nitrogênio na forma de nanocompósito (NCUC) resultou em um peso fresco (31,64 g) e um peso seco (28,67 g) superiores aos obtidos com a aplicação de 100% da dose de ureia convencional (27,44 g e 24,93 g, respectivamente). Esse achado comprovou que o encapsulamento da ureia na matriz de quitosana permite uma redução na quantidade de fertilizante sintético aplicado sem comprometer, e de fato incrementando, o rendimento da biomassa vegetal (KONDAL et al., 2021).

➤ **Análise da cultura de milho e soja**

A otimização do aporte nitrogenado por meio de tecnologias de liberação controlada é essencial para mitigar estresses e maximizar a eficiência nutricional nas culturas de milho e soja. Segundo o estudo de Abou El-Enin et al. (2023), o emprego de nanopartículas de quitosana carregadas com nitrogênio (CS-NNPs) permitiram uma redução estratégica na dependência de fertilizantes minerais aplicados diretamente ao solo. A pesquisa demonstrou que a aplicação de apenas 75% da dose recomendada de nitrogênio (N) via solo, quando integrada a duas intervenções foliares com CS-NNPs, resultou em índices de crescimento, rendimento biológico e produtividade de grãos significativamente superior aos obtidos com o manejo convencional de 100% de N mineral. Esse fenômeno decorre da alta eficiência de translocação proporcionada pela nanotecnologia, visto que as partículas em escala nanométrica (1 a 100 nm) penetram facilmente nas folhas, atuando como um carreador inteligente.

➤ **Dados compilados**

Tabela 3 - Desempenho: matriz de quitosana versus ureia convencional.

Cultura	Parâmetro Analisado	Desempenho (Matriz Quitosana)	Desempenho (Ureia Convencional)	Fonte
Couve-Chinesa	Comprimento do Broto	Incremento de 264,26%	Incremento de 134,56%	FAQIR et al. (2023)
Couve-Chinesa	Teor de Aminoácidos	Aumento de 469,21%	Sem diferença significativa	FAQIR et al. (2023)
Batata	Massa Fresca (100% N)	35,70 g	27,44 g	KONDAL et al. (2021)
Batata	Eficiência de Dose	75% da dose de Ureia	Necessita de 100%	KONDAL et al. (2021)
Milho e Soja	Produtividade	75% da dose de Ureia em aplicação foliar	Baseada em 100% Mineral	ABOU EL-ENIN et al. (2023)

4.2 Efeito antimicrobiano

4.2.1 Compilação da eficácia contra bactérias

A validação da atividade antimicrobiana de matrizes poliméricas baseadas em quitosana quaternizada (HTACC) reticulada com alginato demonstrou uma eficácia notável contra bactérias Gram-positivas, especificamente *Bacillus cereus*, um patógeno de origem edáfica. Ensaios in

vitro de microdiluição colorimétrica revelaram que a formulação otimizada do hidrogel (designada AH1, contendo uma proporção de 50% de alginato e 50% de quitosana quaternizada) alcançou uma taxa de inibição de 100% contra *B. cereus*, apresentando uma Concentração Inibitória Mínima (MIC) extremamente reduzida de 1,95 µg/mL; estes resultados superam a atividade dos componentes isolados e sugerem que a alta densidade de carga positiva dos grupos amônio quaternário facilita a interação eletrostática com a membrana bacteriana carregada negativamente, levando à sua desestabilização e morte celular (ARAFA et al., 2022).

4.2.2 Compilação da eficácia contra fungos

No contexto do controle de fungos fitopatogênicos do gênero *Fusarium*, a aplicação de quitosana em sistemas de cultivo demonstrou reduzir drasticamente a incidência de doenças vasculares e radiculares, como as causadas por *Fusarium oxysporum f.sp. radicis-lycopersici* (FORL). Experimentos realizados com plantas de tomate tratadas com quitosana a uma concentração de 37,5 mg/L evidenciaram uma redução na mortalidade das plantas superior a 90% em comparação com o controle não tratado, além de prevenir perdas de produtividade; a análise ultraestrutural dos tecidos radiculares indicou que, embora a quitosana possua toxicidade direta, sua eficácia in vivo está fortemente correlacionada à indução de mecanismos de defesa da planta, como a formação de papilas, deposição de material osmofílico e oclusão de vasos do xilema, que restringem fisicamente a colonização fúngica às camadas epidérmicas externas (LAFONTAINE; BENHAMOU, 1996).

Complementarmente, a ação da quitosana contra diversos fungos patogênicos: *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*, *Monilina laxa*, *Alternaria alternata* e *Pythium aphanidermatum* envolve mecanismos multifacetados que transcendem a simples barreira física, atuando diretamente na inibição do crescimento micelial e na germinação de esporos. O biopolímero exerce atividade fungicida ao inibir o crescimento micelial e a germinação de esporos, provocando modificações estruturais e morfológicas severas que levam à desorganização das hifas (EL HADRAMI et al., 2010).

4.3 Respostas fisiológicas e bioquímicas à aplicação de quitosana

4.3.1 Influência enzimática na planta

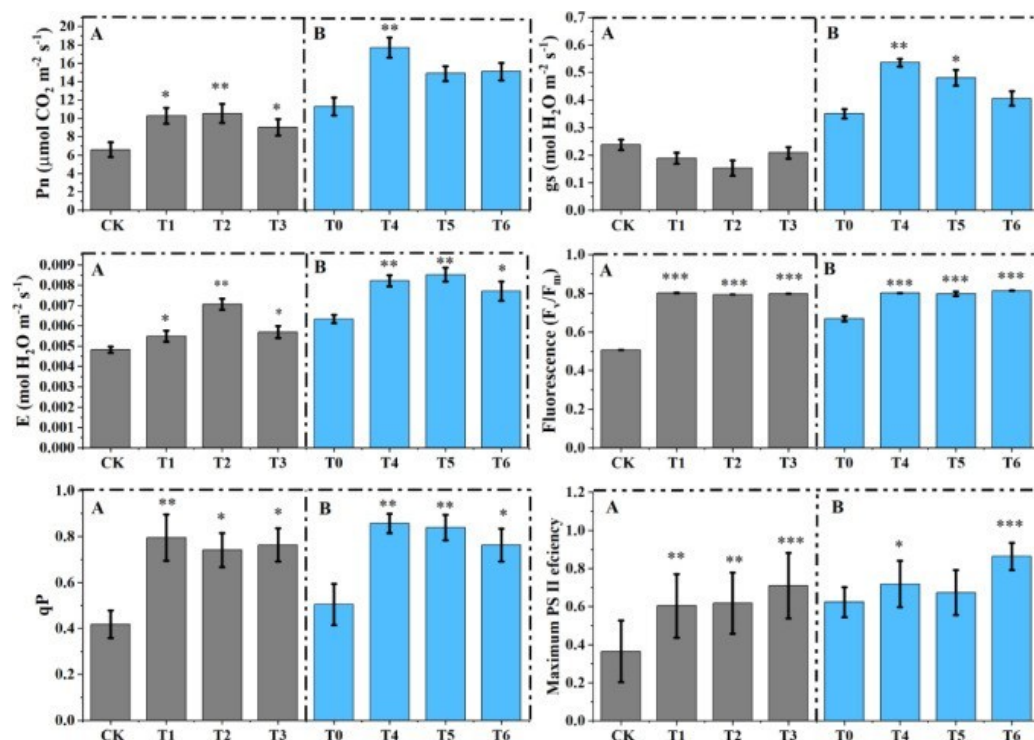
A avaliação dos parâmetros fotossintéticos no cultivo do repolho chinês (*Brassica rapa ssp. pekinensis*) elucidou de forma contundente o desempenho superior dos fertilizantes de liberação controlada ancorados em microesferas de quitosana (Cm-CRNFs) em detrimento da fertilização convencional. Conforme os dados experimentais apresentados na Figura 5, embora a aplicação de ureia não revestida tenha promovido uma elevação na taxa fotossintética líquida (P_n) e na taxa de transpiração (E) em relação ao grupo controle, a matriz polimérica potencializou essas variáveis gasosas de maneira estatisticamente mais expressiva. Observa-se que a condutância estomática (g_s) e as trocas gasosas gerais atingiram seus picos máximos sob os tratamentos com a quitosana. Esse comportamento fisiológico indica que a modulação gradual do nitrogênio mitiga o estresse osmótico e tóxico inicial, frequentemente causado por picos de amônia no solo, favorecendo a plena atividade do aparato fotossintético foliar da cultura de repolho (MA et al., 2023).

Em relação à atividade fotoquímica, detalhada na Figura 5, os dados biológicos do sistema Cm-CRNFs têm elevação estatisticamente superior. O uso do nanocompósito maximizou os parâmetros de fluorescência da clorofila no repolho chinês, com destaque para a eficiência máxima do fotossistema II (PSII), a extinção fotoquímica (q_P) e a relação F_v/F_m , superando largamente as médias obtidas pelas plantas submetidas apenas à ureia livre. Tais variáveis consistem em bioindicadores fisiológicos exatos de que a bioestimulação da quitosana induz um maquinário enzimático altamente funcional. Isso atesta que as organelas dos cloroplastos das plantas tratadas com o polímero conseguem otimizar a captação de energia luminosa, isentando o centro de reação fotossintético de danos estruturais e oxidativos inerentes à fitotoxidez dos insumos químicos tradicionais (MA et al., 2023).

Sob a ótica bioquímica, os resultados compilados na Figura 5 corroboram que a sinergia entre o fornecimento contínuo de nitrogênio e a ação eliciadora da quitosana atua diretamente no metabolismo primário do repolho chinês. A elevação dos parâmetros de fluorescência foliar expande a produção de energia química (na forma de ATP) e o poder redutor celular, elementos fundamentais para as reações do ciclo de Calvin. Além disso, o aumento expressivo da condutância estomática (g_s) nas plantas com liberação controlada facilita a absorção e a dissipação do interno. Esse processo, quando acoplado à atividade otimizada de enzimas de

fixação de carbono, como a rubisco e a anidrase carbônica, consolida uma biossíntese altamente eficiente de carboidratos, justificando o vigor vegetativo superior e o ganho de biomassa alcançado por esta tecnologia (MA et al., 2023).

Figura 5 - Parâmetros fisiológicos e eficiência fotoquímica do fotossistema II em couve-chinesa sob diferentes tratamentos e dosagens de fertilização nitrogenada



Fonte: Ma et al. (2023).

Nota: A figura divide-se em (A) tratamentos com ureia convencional (livre) e (B) tratamentos com fertilizantes de liberação controlada em matriz de quitosana (Cm-CRNFs). CK é o controle sem fertilizante. Em (A), T1, T2 e T3 representam doses de 0,54 g, 0,60 g e 0,80 g de ureia, respectivamente. Em (B), T4, T5 e T6 representam as mesmas doses encapsuladas em quitosana, enquanto T0 indica o uso exclusivo de microesferas vazias.

4.3.2 Mitigação de estresse abiótico: respostas fisiológicas e bioquímicas

A análise dos parâmetros vegetativos e bioquímicos confirma que o estresse salino (100 mM NaCl) impõe limitações severas ao desenvolvimento do tomateiro, enquanto a aplicação foliar de quitosana atua como um agente mitigador eficaz. Conforme sintetizado na Tabela 4, a salinidade reduziu o comprimento da parte aérea em 29,76%, efeito atribuído à toxicidade iônica e ao estresse osmótico que limitam a expansão celular. Entretanto, o tratamento com quitosana promoveu a recuperação do crescimento, com aumentos de até 82,35% em relação às plantas

estressadas. Essa recuperação está correlacionada à proteção do aparelho fotossintético; enquanto a salinidade causou uma queda acentuada nos pigmentos fotossintéticos, a aplicação de quitosana elevou os teores de clorofila a+b em até 123,33% (ATTIA et al., 2021).

Ao analisar a homeostase iônica através dos dados expostos na Tabela 4, verifica-se que a salinidade elevou o teor de sódio (Na^+) em 98,84% e reduziu o de potássio (K^+) em 48,86%. A quitosana mitigou essa toxicidade ao reduzir o acúmulo de Na^+ em até 51,52% e favorecer a manutenção do equilíbrio mineral com um aumento de até 30,08% nos níveis de K^+ . Por fim, a atividade das enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD e PPO), que já era aumentada naturalmente como resposta adaptativa ao estresse, recebeu um reforço adicional significativo com o uso da quitosana, potencializando o sistema enzimático de defesa contra danos oxidativos. Em suma, a aplicação foliar de quitosana, especialmente quando dissolvida em ácido ascórbico ou cítrico, demonstra um efeito sinérgico que melhora a fisiologia da planta e os sistemas de varredura de espécies reativas de oxigênio sob condições de salinidade (ATTIA et al., 2021).

Tabela 4 - Efeito da quitosana em tomateiros submetidos ao estresse salino.

Parâmetro	Estresse Salino (Sem Quitosana)	Estresse Salino + Quitosana	Impacto da Quitosana
Comprimento da Parte Aérea	Redução de 29,76%	Aumento de até 82,35%	Recuperação do crescimento
Clorofila a+b	Queda acentuada	Aumento de até 123,33%	Proteção do sistema fotossintético
Teor de Sódio (Na^+)	Elevação de 98,84%	Redução de até 51,52%	Redução da toxicidade iônica
Teor de Potássio (K^+)	Redução de 48,86%	Aumento de até 30,08%	Manutenção da homeostase iônica
Atividade das enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD e PPO)	Aumentada pelo estresse	Aumento adicional significativo acima do salino	Reforço do sistema enzimático

Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Attia et al. (2021).

4.3.3 Efeitos na microbiota benéfica e atividades enzimáticas do solo

A aplicação de nanopartículas de quitosana (CNPs) exerce uma influência direta sobre a dinâmica das populações microbianas do solo, atuando simultaneamente como fonte de carbono e nitrogênio que estimula o desenvolvimento de microrganismos benéficos. Estudos indicam que a quitosana tem a capacidade de aumentar a contagem de bactérias quitinolíticas, incluindo o gênero *Bacillus* spp., que é comum na fixação de nitrogênio, além de favorecer bactérias fixadoras como *Rhizobium* spp. em campos de leguminosas. Esse polímero desempenha um papel crucial na sinalização molecular, desencadeando o gene NOD em bactérias rizóbicas, o que controla o

desenvolvimento de nódulos e potencializa a fixação simbiótica de nitrogênio. Além disso, a presença de bactérias fixadoras de N_2 é vital, pois elas fornecem às plantas fontes essenciais de amônio, aumentando a eficiência do uso de nutrientes (NANDINI et al., 2025).

Além do estímulo bacteriano, o tratamento com nanopartículas de quitosana demonstra interações complexas com fungos benéficos e atividades enzimáticas essenciais para a mineralização de nutrientes. A aplicação destas nanopartículas aumentou a colonização de fungos micorrízicos arbusculares em 52%, elevando os níveis de auxina e estrigolactona nas raízes em 32% e 21%, respectivamente. No contexto enzimático, enzimas como a desidrogenase e a fosfatase alcalina são fundamentais para a eficiência do uso de nutrientes; a aplicação de nanoquitosana no solo resultou no aumento da atividade da fosfatase alcalina e, conseqüentemente, da atividade microbiana geral, facilitando a mineralização de nutrientes disponíveis no solo para a planta (NANDINI et al., 2025).

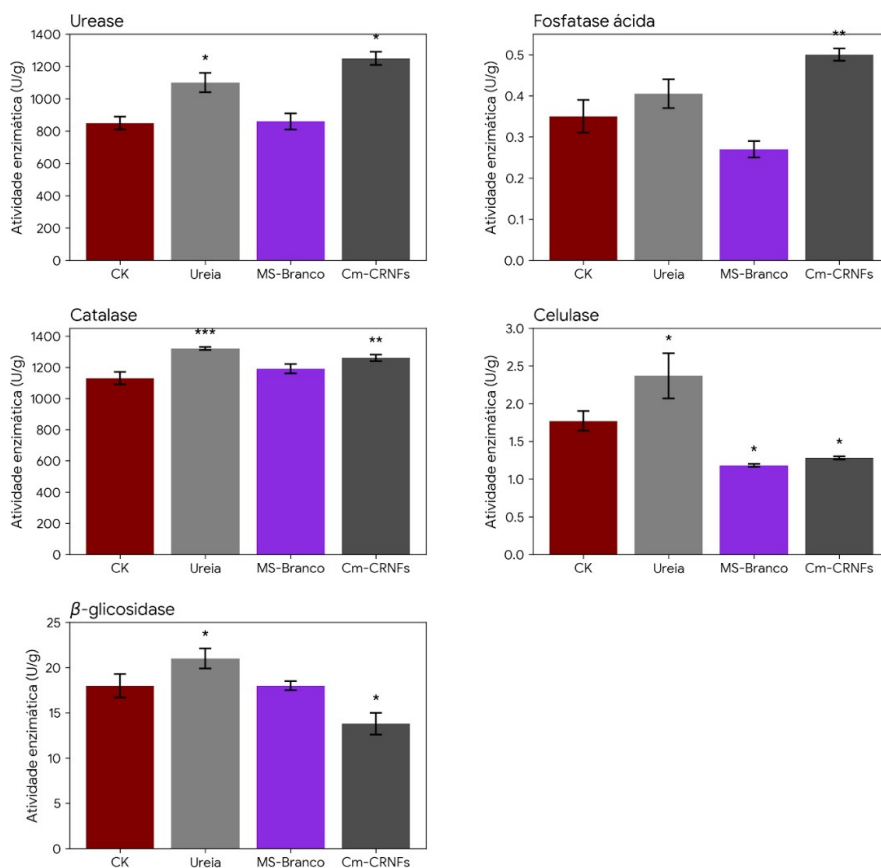
Em investigações sobre fertilizantes de liberação controlada baseados em microesferas de quitosana (Cm-CRNFs) aplicados em *Brassica rapa ssp. pekinensis*, observou-se uma alteração significativa na diversidade bacteriana do solo, conforme ilustrado na Figura 6. Embora o índice de riqueza Chao tenha apresentado uma redução de 15,89% no tratamento com Cm-CRNFs, o índice de diversidade de Shannon aumentou 23,55% em comparação ao controle, indicando uma comunidade bacteriana mais equilibrada e diversa (FAQIR et al., 2023).

O tratamento influenciou positivamente a riqueza de gêneros como *Arthrobacter*, *Archangium*, *Bacillus* e *Flaviumibacter*. Além disso, houve um incremento na abundância relativa de filos bacterianos cruciais, incluindo *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota*, *Chloroflexi*, *Cyanobacteria* e *Patescibacteria*, sugerindo que a liberação prolongada de nutrientes favoreceu a composição equilibrada desses filos (FAQIR et al., 2023).

Paralelamente às alterações na diversidade microbiana, a atividade enzimática do solo respondeu de maneira distinta à aplicação de Cm-CRNFs. Os resultados presentes na Figura 6 demonstraram que a atividade da urease aumentou em 46,54% e a da fosfatase ácida em 14,94% sob tratamento com Cm-CRNFs, diferindo do tratamento apenas com ureia sendo: 36,09% de aumento da urease e em relação a fosfatase ácida o tratamento com ureia não mostrou diferença significativa. A enzima catalase, que mede a capacidade redox correspondente às atividades bioquímicas do solo, também teve sua atividade aumentada, possivelmente devido à capacidade das microesferas de quitosana de controlar o fornecimento de nitrogênio. Em contrapartida, observou-se uma diminuição nas atividades de celulase e β -glicosidase, o que pode ser atribuído à presença de segmentos recalcitrantes ou cristalinos dos polímeros durante a biodegradação ou

ainda a uma alteração no pH do solo mediada pela quitosana, que pode ter afetado a cinética dessas enzimas específicas (FAQIR et al., 2023).

Figura 6 - Dinâmica da atividade enzimática do solo sob diferentes sistemas de liberação de nitrogênio.



Fonte: Adaptada de Faqir et al. (2023).

Nota: CK (Controle); MS-Branco (Microesferas puras); Cm-CRNFs (Fertilizante de liberação controlada em matriz de quitosana). As análises contemplam as enzimas urease, fosfatase ácida, catalase, celulase e β-glicosidase.

4.4 Considerações finais sobre a sinergia do uso da quitosana

A análise integrada dos parâmetros físico-químicos, fisiológicos e ecológicos discutidos ao longo deste trabalho revela que a quitosana não atua meramente como uma barreira física passiva, mas como uma interface biológica ativa entre o fertilizante e o ecossistema. Enquanto os revestimentos poliméricos tradicionais, derivados do petróleo, cumprem apenas a função de retardar a solubilidade e geram passivos ambientais críticos como a "poluição branca", a quitosana estabelece um novo padrão de sustentabilidade. Ao utilizar mecanismos complexos de difusão multi-estágio e intumescimento da matriz, o biopolímero permite que a entrega do nitrogênio

acompanhe a curva de demanda real das culturas, resolvendo o gargalo da ineficiência metabólica que caracteriza a ureia convencional.

Sob a ótica da saúde do solo, a aplicação dessas matrizes biopoliméricas demonstra ser um potente condicionador biológico. Diferente das fontes nitrogenadas solúveis que frequentemente provocam a acidificação e o declínio da biodiversidade microbiana, as formulações de quitosana protegem a microbiota benéfica e modulam de forma equilibrada a atividade de enzimas edáficas essenciais para o ciclo de nutrientes, como a urease e a fosfatase ácida. Esse microambiente resiliente na rizosfera é o que garante que o nitrogênio permaneça disponível por mais tempo, reduzindo drasticamente as perdas por lixiviação e volatilização que historicamente degradam ecossistemas adjacentes.

No nível vegetal, a sinergia entre o fornecimento contínuo de nutrição e a bioatividade intrínseca da quitosana resulta em um metabolismo primário otimizado. A capacidade de atuar como um elicitador exógeno, mimetizando sinais de alerta biológicos, permite que a planta desenvolva uma resistência sistêmica contra patógenos e uma tolerância superior a estresses abióticos. Fica evidente que a otimização das propriedades estruturais deste biopolímero é o caminho para atingir o ápice da Eficiência do Uso de Nitrogênio (NUE), cujos resultados empíricos e validações finais deste estudo serão detalhados a seguir.

5 CONCLUSÃO

A presente revisão bibliográfica confirmou o elevado potencial tecnológico da quitosana como uma matriz biopolimérica multifuncional em fertilizantes de liberação controlada, fundamentando a integração entre a nutrição nitrogenada, a bioestimulação e a proteção fitossanitária. A investigação evidenciou que este biopolímero não atua apenas como uma barreira física, mas como uma interface ativa que soluciona o passivo ambiental da poluição branca decorrente do uso de polímeros sintéticos não biodegradáveis. Dessa forma, a tecnologia atende à necessidade de aumentar a produtividade agrícola para garantir a segurança alimentar global de maneira sustentável.

No que concerne aos mecanismos de liberação, constatou-se que a cinética de entrega de nutrientes é regida pelas propriedades físico-químicas da quitosana, especificamente seu processo de desacetilação e sua natureza policatiônica. Essas características possibilitam a formação de matrizes que operam por meio de fenômenos de difusão multiestágio e intumescimento, permitindo sincronizar a oferta de nitrogênio com a curva de demanda fisiológica e absorção das culturas. Tal versatilidade metodológica garante que o fertilizante atue de forma previsível e estável frente às condições do solo.

O desempenho agrônômico das matrizes de quitosana carregadas com nitrogênio mostrou-se superior ao da fertilização convencional, promovendo um desenvolvimento vegetativo e reprodutivo vigoroso. A sinergia entre o biopolímero e o nutriente otimiza rotas metabólicas essenciais, resultando em ganhos de biomassa e na melhoria da qualidade bioquímica e nutricional das plantas. De extrema relevância é a constatação de que o uso desta tecnologia permite a redução da carga de fertilizantes minerais sem prejuízo à produtividade, elevando significativamente a eficiência do uso de nitrogênio.

No âmbito da proteção fitossanitária, a quitosana consolidou-se como um agente multifacetado que atua por ação antimicrobiana direta e como um potente eliciador exógeno. Ao mimetizar sinais de alerta biológicos, o biopolímero desencadeia imunidade sistêmica das plantas e induz respostas defensivas estruturais que restringem a colonização por patógenos bacterianos e fúngicos. Além disso, a aplicação desta tecnologia demonstrou ser eficaz na mitigação de estresses abióticos, como a salinidade, ao proteger o aparato fotossintético, restaurar a homeostase mineral e reforçar o sistema enzimático antioxidante.

Quanto à ecologia da rizosfera, as formulações baseadas em quitosana funcionam como condicionadores biológicos que favorecem a biodiversidade e o equilíbrio das comunidades

microbianas benéficas no solo. Observou-se uma modulação controlada da atividade de enzimas edáficas essenciais para a ciclagem de nutrientes, como a urease e a fosfatase, criando um microambiente radicular mais resiliente. Por fim, a influência do biopolímero no metabolismo fisiológico otimiza a ativação de cloroplastos e a eficiência na fixação de carbono, garantindo o vigor vegetativo pleno. Em suma, a quitosana consolida-se como uma plataforma inteligente que alinha a produtividade aos princípios da química verde e da sustentabilidade.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar das evidências promissoras identificadas na literatura, a transição para a escala industrial e a maximização dos benefícios da quitosana ainda demandam investigações adicionais:

- **Estudos de escalonamento (Scale-up):** Realizar análises de viabilidade econômica e de engenharia de processos para a produção em larga escala de microesferas, filmes entre outros, avaliando o custo-benefício em comparação aos polímeros petroquímicos.
- **Ensaio de campo de longa duração:** Conduzir experimentos em diferentes tipos de solos e condições climáticas variadas para validar a taxa de biodegradação da matriz e o efeito acumulativo na microbiota do solo ao longo de múltiplas safras.
- **Fontes alternativas de quitina:** Investigar a produção de quitosana a partir de resíduos de fungos ou insetos, visando uma economia circular ainda mais ampla.
- **Sinergia com micronutrientes:** Explorar a capacidade de complexação da quitosana para o carregamento simultâneo de micronutrientes metálicos (Zinco, Cobre, Manganês), criando fertilizantes grande espectro de liberação controlada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOU EL-ENIN, M. M.; SHEHA, A. M.; EL-SERAFY, R. S.; ALI, O. A. M.; SAUDY, H. S.; SHAABAN, A. Foliage-sprayed nano-chitosan-loaded nitrogen boosts yield potentials, competitive ability, and profitability of intercropped maize-soybean. **International Journal of Plant Production**, v. 17, n. 3, p. 517-542, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00253-4>
- ARAFA, E. G.; SABAA, M. W.; MOHAMED, R. R.; KAMEL, E. M.; ELZANATY, A. M.; MAHMOUD, A. M.; ABDEL-GAWAD, O. F. Eco-friendly and biodegradable sodium alginate quaternized chitosan hydrogel for controlled release of urea. **Carbohydrate Polymers**, v. 291, p. 119555, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119555>
- ATTIA, M. S.; OSMAN, M. S.; MOHAMED, A. S.; MAHGOUB, H. A.; GARADA, M. O.; ABDELMOUTY, E. S.; ABDEL LATEF, A. A. H. Impact of foliar application of chitosan dissolved in different organic acids on isozymes, protein patterns and physio-biochemical characteristics of tomato grown under salinity stress. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 388, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020388>
- BOUANGA, A.; EL ASSRI, S.; BOUHARROUD, R.; ASEHRAOU, A.; BALÁZS, V. L.; SZÉCHENYI, A.; HOCK, V.; SABBAHI, R. Chitosan at the crossroads: Engineering sustainable biofunctional materials for health, food, and environmental resilience. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 353, p. 151305, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151305>
- CAHYANINGRUM, S. E.; LUSIANA, R. A.; NATSIR, T. A.; MUHAJIMIN, F. I.; WARDANA, A. P.; PURNAMASARI, A. P.; MISRAN, M. B. Synthesis and characterization of chitosan-modified membrane for urea slow-release fertilizers. **Heliyon**, v. 10, n. 14, e34981, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34981>
- CHUNG, Y.-C.; CHEN, C.-Y. Antibacterial characteristics and activity of acid-soluble chitosan. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 2806-2814, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.044>

- EDDARAI, E. M.; EL MOUZAHIM, M.; RAGAOUI, B.; ELADAOUI, S.; BOURD, Y.; BELLAOUCHOU, A.; BOUSSEN, R. Review of current trends in chitosan based controlled and slow-release fertilizer: From green chemistry to circular economy. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 134982, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134982>
- EL HADRAMI, A.; ADAM, L. R.; EL HADRAMI, I.; DAAYF, F. Chitosan in plant protection. **Marine Drugs**, v. 8, n. 4, p. 968-987, 2010. <https://doi.org/10.3390/md8040968>
- FAQIR, Y.; CHAI, Y.; JAKHAR, A. M.; LUO, T.; LIAO, S.; KALHORO, M. T.; TAN, C.; SAJID, S.; HU, S.; LUO, J.; LIU, S.; UMER, N.; MA, J. Chitosan microspheres-based controlled-release nitrogen fertilizers improve the biological characteristics of Brassica rapa ssp. pekinensis and the soil. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 253, p. 127124, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127124>
- HARISH PRASHANTH, K. V.; THARANATHAN, R. N. Chitin/chitosan: modifications and their unlimited application potential—an overview. **Trends in Food Science & Technology**, v. 18, n. 3, p. 117-131, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.10.022>
- HELANDER, I. M.; NURMIAHO-LASSILA, E. L.; AHVENAINEN, R.; RHOADES, J.; ROLLER, S. Chitosan disrupts the barrier properties of the outer membrane of Gram-negative bacteria. **International Journal of Food Microbiology**, v. 71, n. 2-3, p. 235-244, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00609-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00609-2)
- HUANG, J.; XU, C.-C.; RIDOUTT, B. G.; WANG, X.-C.; REN, P.-A. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 159, p. 171-179, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.008>
- IFTIME, M. M.; AILIESEI, G. L.; UNGUREANU, E.; MARIN, L. Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention. **Carbohydrate Polymers**, v. 223, p. 115040, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115040>

- KASSEM, I.; ABLOUH, E.-H.; EL BOUCHTAOUI, F.-Z.; JAOUAHAR, M.; EL ACHABY, M. Polymer coated slow/controlled release granular fertilizers: Fundamentals and research trends. **Progress in Materials Science**, v. 144, p. 101269, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101269>
- KONDAL, R.; KALIA, A.; KREJCAR, O.; KUCA, K.; SHARMA, S. P.; LUTHRA, K.; DHERI, G. S.; VIKAL, Y.; TAGGAR, M. S.; ABD-ELSALAM, K. A.; GOMES, C. L. Chitosan-urea nanocomposite for improved fertilizer applications: The effect on the soil enzymatic activities and microflora dynamics in N cycle of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). **Polymers**, v. 13, n. 17, p. 2887, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13172887>
- LAFONTAINE, P. J.; BENHAMOU, N. Chitosan treatment: An emerging strategy for enhancing resistance of greenhouse tomato plants to infection by *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 6, n. 1, p. 111-124, 1996. <https://doi.org/10.1080/09583159650039575>
- LAKSHANI, N.; WIJERATHNE, H. S.; SANDARUWAN, C. Release kinetic models and release mechanisms of controlled-release and slow-release fertilizers. **ACS Agricultural Science & Technology**, v. 3, n. 11, p. 939-956, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.3c00152>
- MA, J.; FAQIR, Y.; CHAI, Y.; WU, S.; LUO, T.; LIAO, S.; KALERI, A. R.; TAN, C.; QING, Y.; KALHORO, M. T.; UMER, N.; HADIR, W. Chitosan microspheres-based controlled release nitrogen fertilizers enhance the growth, antioxidant, and metabolite contents of Chinese cabbage. **Scientia Horticulturae**, v. 308, p. 111542, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111542>
- MARQUEZ CAZORLA, J. I.; MORENO ROQUE, C. S.; VERA GONZALES, C. A.; DA COSTA, L. P.; CARNERO CANALES, C. S. Controlled-release nanofertilizer using chitosan nanoparticles loaded with NPK: Development and impact on the yield and nutritional quality of *Solanum tuberosum*. **Scientia Agropecuaria**, v. 16, n. 4, p. 633-645, 2025. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2025.048>

- MEENA, P.; MONDAL, K.; SAHARAN, V.; JAIN, D.; YADAV, R. B.; RAWAL, P.; MEENA, R. H.; MEENA, K.; MEENA, M. K. Understanding morpho-physiological responses of maize towards ammonium-loaded chitosan nano-fertilizer. **South Asian Journal of Agricultural Sciences**, v. 4, n. 2, p. 56-59, 2024. <https://doi.org/10.22271/27889289.2024.v4.i2a.144>
- MESSA, L. L.; CONTIERI, G. A.; FAEZ, R. Sugarcane bagasse fibers derivatives and their application in chitosan-based composite films for NPK fertilizer release. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 34, n. 5, p. 653-663, 2023. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20220135>
- NANDINI, T.; SUDHALAKSHMI, C.; SIVAKUMAR, K.; PARAMESWARI, E.; THANGAMANI, C. A review-chitosan nanoparticles towards enhancing nutrient use efficiency in crops. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 306, p. 141433, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141433>
- PEREIRA, E. I.; DA CRUZ, C. C. T.; SOLOMON, A.; LE, A.; CAVIGELLI, M. A.; RIBEIRO, C. Novel slow-release nanocomposite nitrogen fertilizers: The impact of polymers on nanocomposite properties and function. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 14, p. 3717-3725, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00176>
- SHAVIV, A.; RABAN, S.; ZAIDEL, E. Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: Diffusion release from single granules. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 10, p. 2251-2256, 2003. <https://doi.org/10.1021/es011462v>
- TRENKEL, M. E. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010. <https://www.fertilizer.org/resource/slow-and-controlled-release-and-stabilized-fertilizers-in-agriculture/>
- VEJAN, P.; KHADIRAN, T.; ABDULLAH, R.; AHMAD, N. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. **Journal of Controlled Release**, v. 339, p. 321-334, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.10.003>

YOUNES, I.; RINAUDO, M. Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. **Marine Drugs**, v. 13, n. 3, p. 1133-1174, 2015. <https://doi.org/10.3390/md13031133>

ZAHOR; FAQIR, Y.; DAI, W.; LAI, Q.; MA, J.; TAN, C. Utilization of chitosan for the controlled-release fertilizer and its impact on plant and soil. **Materials Today Communications**, v. 47, p. 113213, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113213>